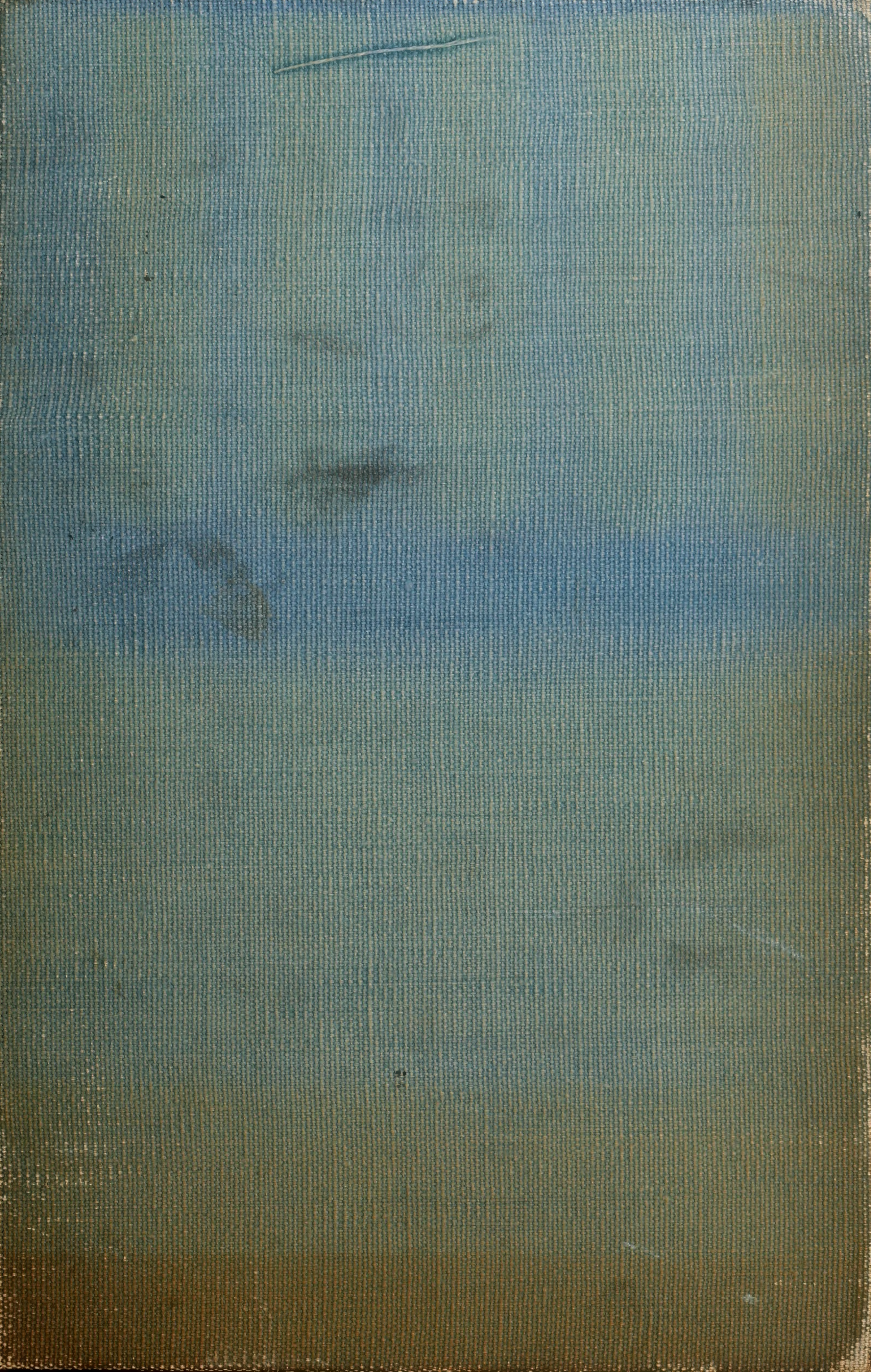
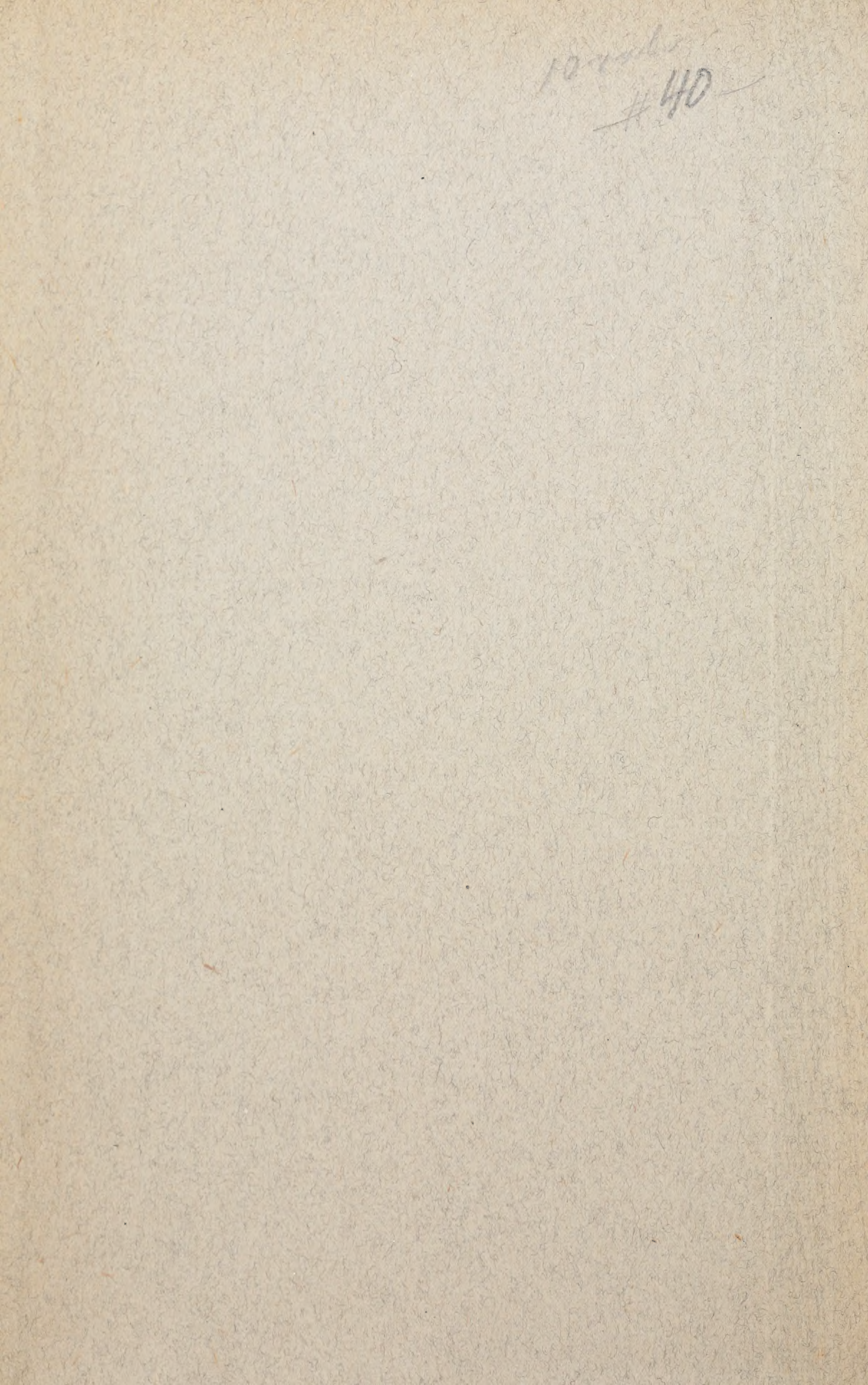
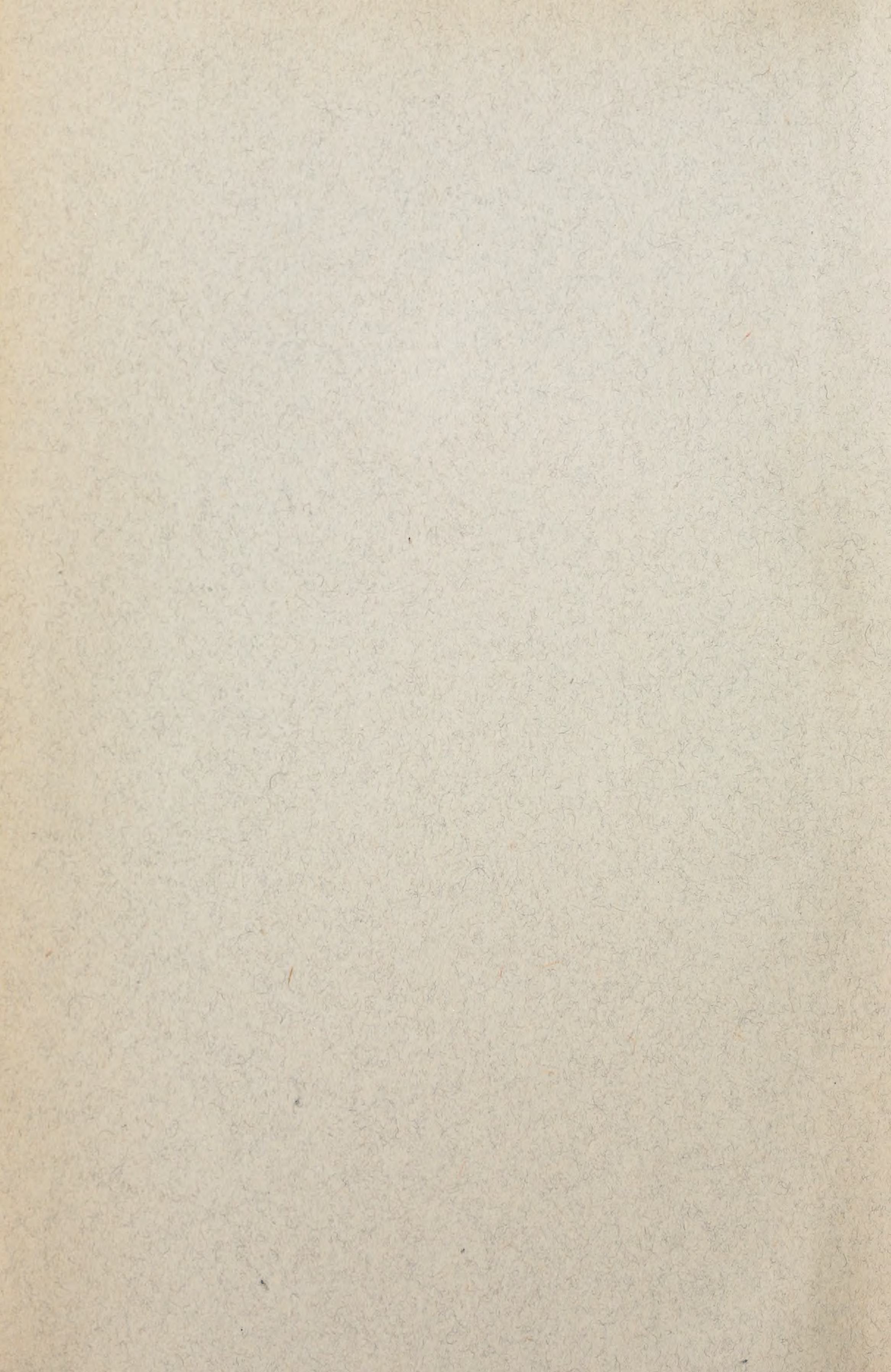












Handwörterbuch der Naturwissenschaften.

Erster Band.



Handwörterbuch
der
Naturwissenschaften

Herausgegeben von

Prof. Dr. E. Korschelt-Marburg (Zoologie)
Prof. Dr. G. Linck-Jena (Minerologie und Geologie)
Prof. Dr. F. Oltmanns-Freiburg (Botanik)
Prof. Dr. K. Schaum-Leipzig (Chemie)
Prof. Dr. H. Th. Simon-Göttingen (Physik)
Prof. Dr. M. Verworn-Bonn (Physiologie)
Dr. E. Teichmann-Frankfurt a. M. (Hauptredaktion)

Erster Band
Abbau — Black

Mit 631 Abbildungen



JENA
Verlag von Gustav Fischer
1912

Vorwort.

Mit dem Handwörterbuch der Naturwissenschaften wird der Oeffentlichkeit ein Werk übergeben, das insofern als etwas grundsätzlich Neues gelten darf, als hier zum erstenmal das Gesamtgebiet der Naturwissenschaften in lexikalisch angeordneten Darstellungen zusammengefaßt wird. Das Werk, zu dem sich mehr als 300 Gelehrte als Mitarbeiter vereinigt haben, beabsichtigt damit, einen Ueberblick über das naturwissenschaftliche Wissen der Gegenwart zu geben und außerdem die Möglichkeit zu bieten, daß die vielfach auseinanderstrebenden Einzelgebiete der Naturwissenschaften einander wieder näher gebracht werden. Möge es dem Handwörterbuch der Naturwissenschaften gelingen, dieses wissenschaftlich-praktische Ziel zu erreichen, in ähnlicher Weise wie es für ein anderes Gebiet durch das Handwörterbuch der Staatswissenschaften in vorbildlicher Weise geschehen ist.

Jena, im Mai 1912.

Der Verlag.



Inhaltsübersicht.

(Nur die selbständigen Aufsätze sind hier aufgeführt. Eine Reihe von Verweisungen findet sich innerhalb des Textes und ein später herauszugebendes Sachregister wird nähere Auskunft geben.)

A.

[1]) Weltäther wird in Band X behandelt werden.

B.





A.

Abbau.

1. Zweck des Abbaus. 2. Oxydativer Abbau. 3. Abbau durch Reduktion. 4. Abbau durch Hydrolyse. 5. Abbau mit Hilfe der Zinkstaubdestillation, der Alkalischmelze, der Erhitzung mit Brom. 6. Erschöpfende Methylierung. 7. Aufspaltung zyklischer Basen mit Hilfe von Phosphorhaloiden. 8. Aufspaltung zyklischer tertiärer Amine mit Hilfe von Bromcyan.

1. Zweck des Abbaus. Einen wichtigen Teil des chemischen Studiums der organischen Verbindungen bildet die Untersuchung der mannigfachen Zersetzungsprodukte, die durch die Einwirkung verschiedener Agentien daraus hervorgehen. Derartige Untersuchungen werden insbesondere deshalb vorgenommen, um eine möglichst große Summe von Erscheinungen zu gewinnen, aus denen sich zuletzt ein Schluß auf die rationelle Zusammensetzung des untersuchten Körpers ziehen läßt. Man unterwarf z. B. die Essigsäure der Einwirkung des Chlors, das essigsaure Calcium und essigsaure Kalium mit überschüssigem Kaliumhydroxyd der trocknen Destillation, nicht nur, um Chloressigsäure oder Aceton und Methan zu erhalten, sondern um zunächst zu sehen, in welcher Weise sich hierbei die Bestandteile der Essigsäure umsetzen und neu gruppieren, und um sodann daraus weiter auf deren K o n s t i t u t i o n zu schließen. Die Konstitutionsformel stellt die einfachste und kürzeste Beschreibung der Entstehungs- und Umwandlungsmöglichkeiten einer Substanz dar. Selten genügen zu ihrer Ermittelung einzelne Beobachtungen, vielmehr sind in den meisten Fällen zahlreiche Umwandlungen, insbesondere Zersetzungsreaktionen, notwendig. Die Erfahrung hat gelehrt, welche Veränderungen und Effekte die verschiedenen derartigen chemischen Eingriffe, die wir Abbaureaktionen nennen und die zur Konstitutionsbestimmung dienen, hervorbringen. Eine kurze übersichtliche Zusammenstellung der wichtigsten Abbaureaktionen möge nunmehr folgen.

2. Oxydativer Abbau. Die in wissenschaftlichen Arbeiten so häufig vorkommende Operation der Oxydation kann sichere und wichtige Schlüsse hinsichtlich der Konstitution chemischer Verbindungen zulassen, da sie den Abbau zahlreicher Körperklassen ermöglicht, wie folgende Aufzählung lehrt: 1. Abbau der Alkohole $R.CH_2.CH_2.OH$ zu Säuren R.COOH. 2. Abbau von Säureamiden zu Aminen $R.CO.NH_2 \rightarrow R.NH_2$. 3. Abbau von Säuren zu Alkoholen $R.COOH \rightarrow R.OH$. 4. Abbau der Gruppe $R.CH_2.COOH$ und $R.CH_2.CH_2.COOH$ zu R.COOH. 5. Abbau der Gruppe $R.CH_2.CH_2.COOH \rightarrow R.CO.CH_2.COOH \rightarrow R.CO.CH_3$. 6. Oxydation der Methylketone $R.CO.CH_3$ zu Säuren R.COOH. 7. Abbau der α-Oxysäuren und α-Aminosäuren zu Aldehyden oder Ke) tonen $R.CHOH.COOH \rightarrow R.CHO$: $(R)(R_1)C(OH).COOH \rightarrow (R)(R_1)CO$. 8. Abbau der Ketonsäuren R.CO.COOH zu R.COOH und der α-Diketone zu Säuren. 9. Sprengung von Doppelbindungen in offenen Ketten. 10. Oxydation von Phenyl- oder ähnlichen Gruppen zu COOH. 11. Ringspaltungen durch Oxydation und zwar bei Benzolringen, alizyklischen und heterozyklischen Verbindungen. Einige interessante Beispiele mögen zur Erläuterung dienen.

Bei der Oxydation der Ketone (6) durch C h r o m s ä u r e wird im allgemeinen das mit Wasserstoff weniger beladene Radikal zuerst angegriffen (hydroxyliert) und es erfolgt dann zwischen diesen und dem Carbonyl die Spaltung. So wird Methylamylketon gespalten in Essigsäure und Valeriansäure $CH_3.CO.(CH_2)_4.CH_3 \rightarrow CH_3.COOH + COOH(CH_2)_3.CH_3$.

α-Aminosäuren lassen sich entweder bei der Destillation mit W a s s e r s t o f f s u p e r o x y d oder auch durch Bleisuperoxyd zu Aldehyden abbauen (7). Leucin geht so in Isovaleraldehyd bezw. Isovaleriansäure über. $R.CH(NH_2).COOH + O = R.CHO + NH_3 + CO_2$.

Die Sprengung der Doppelbindungen in offenen Ketten (9) läßt sich mit verschiedenen Oxydationsmitteln erreichen. Man verwendet häufig K a l i u m p e r m a n g a -

n a t, K a l i u m d i c h r o m a t und S c h w e f e l s ä u r e, ferner S a l p e t e r s ä u r e.

Kaliumpermanganat namentlich greift die doppelten Bindungen des Kohlenstoffs an, wobei es zunächst Hydroxyle addiert. Die Additionsprodukte, Glykole, werden am sichersten durch Chromsäure weiter oxydiert und an Stelle der ursprünglichen Doppelbindung gesprengt

$$\begin{matrix} R_1 = CH \\ R_2 = CH \end{matrix} \rightarrow \begin{matrix} R_1 - CHOH \\ R_2 - CHOH \end{matrix} \rightarrow \begin{matrix} R_1 - COOH \\ R_2 - COOH \end{matrix}$$

Eine interessante Art der Oxydation vollzieht sich bei der Einwirkung von O z o n auf ungesättigte Verbindungen (Kohlenwasserstoffe, Alkohole, Amine, Aldehyde, Ketone und Säuren). Es entsteht zunächst unter Addition von Ozon ein O z o n i d, das dann beim Erwärmen mit Wasser, Eisessig oder Natronlauge glatte Spaltung erleidet, z. B. in folgendem Sinne:

$$>C - O_3 - C< + H_2O = >CO + >CO + H_2O_2.$$

Hierbei entstehen Aldehyde oder Ketone, deren Identifizierung einen sicheren Schluß auf die Konstitution der ozonisierten Verbindung ermöglicht. Die Ergebnisse der Spaltung der Ozonkörper mit Wasser, Eisessig oder Natronlauge kann man also mit Erfolg zur Bestimmung der Lage der Doppelbindungen in den ungesättigten Verbindungen benützen. Das Verfahren, das von H a r r i e s und seinen Schülern ausgearbeitet ist, hat z. B. vortreffliche Dienste geleistet bei der Aufklärung der Konstitution des Kautschuks. Im übrigen hat es auch Bedeutung für präparative Zwecke.

Behandelt man K a u t s c h u k $(C_{10}H_{16})_x$ in Chloroformlösung mit Ozon, so werden zwei Moleküle des letzteren addiert. Von dem so entstehenden Diozonid des Kautschuks läßt sich, da es leicht löslich ist, die Molekulargröße bestimmen, sie ist $C_{10}H_{16}O_6$. Daraus folgt, daß bei der Behandlung des Kautschuks mit Ozon eine Depolymerisation des hohen Moleküls der Addition des Ozons vorhergeht. Kocht man dieses Diozonid mit Wasser, so zerfällt es in Lävulinaldehyd $CH_3.CO.CH_2.CH_2.CHO$, Lävulinsäure $CH_3.CO.CH_2.CH_2.COOH$ und Lävulinaldehyddiperoxyd $CH_3.CO_2.CH_2.CH_2.CHO_2$. Daraus geht hervor, daß das Kautschukozonid einen 8-Kohlenstoffring enthalten muß und daß der Kohlenwasserstoff, der dem Kautschuk zugrunde liegt, das 1,5-Dimethylcyclooctadien ist von der Formel

$$CH_3.C \begin{matrix} \diagup CH_2.CH_2.CH \diagdown \\ \diagdown CH.CH_4.CH_2 \diagup \end{matrix} C.CH_3$$

Die Methode der oxydierenden Spaltung kommt auch in Betracht für tiefgreifenden Abbau ringförmiger Verbindungen (11). Der Benzolring setzt dem Abbau großen Widerstand entgegen, und zwar tritt bei energischer Oxydation völlige Zertrümmerung des Moleküls ein. Für Konstitutionsbestimmungen kommen insbesondere in Betracht die Abbaumethoden, nach denen Benzolringe in kondensierten Ringsystemen bis zu Karboxylgruppen aboxydiert werden. In dem einfachsten Fall der Kondensation von Benzolringen, beim N a p h t a l i n, gelingt es nach verschiedenen Verfahren, den einen Ring fortzuoxydieren und zur P h t a l s ä u r e zu gelangen

$$C_6H_4 \begin{matrix} \diagup CH:CH \\ \diagdown CH:CH \end{matrix} \rightarrow C_6H_4 \begin{matrix} \diagup COOH \\ \diagdown COOH \end{matrix}$$

So erhält man reichliche Mengen von Phtalsäure durch Erhitzen von Naphtalin mit h o c h k o n z e n t r i e r t e r S c h w e f e l s ä u r e b e i G e g e n w a r t v o n M e r k u r i s u l f a t als Katalysator. Auf diese Weise wird Phtalsäure technisch in großen Mengen, insbesondere zum Zwecke der Fabrikation von Indigo und anderen Farbstoffen, dargestellt. Ebenso lassen sich Naphtole Naphtylamine, Phenanthren und Anthracen zu Phtalsäure abbauen.

Ist der Benzolkern mit einem heterozyklischen Ring kondensiert, so läßt er sich besonders in alkalischer Lösung durch Kaliumpermanganat aboxydieren. C h i n o l i n wird so in C h i n o l i n s ä u r e übergeführt, ebenso wie die im Benzolkern substituierten Chinoline

```
     HC     CH                       N
HC//  \C/  \\CH          HC//  \C/COOH
 |     ||    |      ->     |     ||
HC\\  /C\  //CH          HC\\  /C\COOH
     N      CH                  CH
```

Bezüglich der oxydativen Spaltung der zahlreichen gesättigten und ungesättigten alizyklischen Verbindungen gilt die Regel, daß die wasserstoffärmsten Gruppen zuerst vom Oxydationsmittel angegriffen werden, sowie daß bei Anwesenheit eines Sauerstoffatoms im gesättigten Molekül hier die Oxydation weiter einsetzt. Ist der Ring an irgendeiner Stelle ungesättigt, so findet dort Addition von Hydroxylen und zwischen den betreffenden Kohlenstoffatomen dann die Spaltung statt. Das gesättigte Cyklohexan, das sich im hannöverschen, galizischen und kaukasischen Petroleum findet, wird nur verhältnismäßig schwer angegriffen, erst bei langer Einwirkung konzentrierter Salpetersäure geht es in Adipinsäure über

$$\begin{matrix} CH_2 - CH_2 - CH_2 \\ CH_2 - CH_2 - CH_2 \end{matrix} \rightarrow \begin{matrix} CH_2 - CH_2 - COOH \\ CH_2 - CH_2 - COOH \end{matrix}$$

Der Abbau durch Oxydation ist mit Vorteil in der Neuzeit auch auf sehr kompliziert gebaute Verbindungen, nämlich auf B l u t - und B l a t t f a r b s t o f f angewandt worden. Das O x y h ä m o g l o -

bin, der färbende und wesentlichste Bestandteil der roten Blutkörperchen, welches aus den meisten Blutarten kristallisiert erhalten werden kann, zerfällt schon bei leiser Einwirkung von Säuren in ein Gemisch von Eiweißarten und einen eisenhaltigen Körper, der zu etwa 4 % gewonnen werden kann und den Namen Hämatin führt. Eine esterartige Verbindung desselben mit Salzsäure wird als Hämin bezeichnet.

W. Küster hat Hämatine verschiedener Herkunft durch Chromate in Eisessiglösung oxydiert und dabei das Imid (II) $C_8H_9O_4N$ der dreibasischen Hämatinsäure $_1$(I)

$$
\begin{array}{c}
\text{I} \\
CH_3 - C - COOH \\
\| \\
HO_2C - CH_2 - CH_2 - C - COOH
\end{array}
$$

$$
\begin{array}{c}
\text{II} \\
H_3C - C - CO \\
\| \quad\quad > NH \\
HO_2C - CH_2 - CH_2 - C - CO
\end{array}
$$

erhalten. Daraus ergibt sich für die Gesamtkonstitution des Hämatins von der Formel $C_{34}H_{34}O_5N_4Fe$, daß die Atomgruppierung der Hämatinsäure C_8... mindestens dreimal im Hämatinmolekül enthalten ist, wahrscheinlich ist sie sogar viermal darin, und dann würden wir nur noch über zwei Kohlenstoffatome im unklaren sein, während der gesamte Stickstoff, wie aus unten zu besprechenden Reaktionen folgt, wohl in Form von vier Pyrrolringen vorhanden ist.

Analoge Abbaureaktionen wie mit Hämatin wurden auch mit Abkömmlingen des Blattfarbstoffs Chlorophyll durchgeführt. L. Marchlewski hat Phylloporphyrin mit Chromsäure nach der Methode von Küster oxydiert und daraus die Hämatinsäure in ihrer stickstofffreien Form ($C_8H_8O_5$) erhalten. Willstätter und Asahina haben eine Reihe von Chlorophyllderivaten nach verschiedenen Methoden oxydiert. Die Ausgangsmaterialien waren namentlich Phylloporphyrin, Pyrroporphyrin, Rhodoporphyrin und Phytochlorin. Die Oxydation hat in allen Fällen das Gleiche ergeben. Wenn man Bleisuperoxyd und Schwefelsäure, Chromsäure oder Carosche Säure einwirken läßt, so führt sie zu einem Gemisch, das, von kleinen Spaltungsstücken des Moleküls wie Essigsäure und Kohlensäure abgesehen, aus zwei Hauptprodukten besteht nämlich aus Hämatinsäure, die stets als Imid von der Formel II auftritt und aus dem Methyläthylmaleinimid, welches Küster zuerst durch Abspaltung von Kohlensäure aus dem Imid der Hämatinsäure erhalten und dann auch synthetisch dargestellt hat. Die Oxydation der Chlorophyllderivate erfolgt am glattesten durch Chromsäure.

Die Ergebnisse des oxydativen Abbaues sprechen also für die nahe chemische Verwandtschaft des Chlorophylls und des roten Blutfarbstoffs, ebenso wie der gleich zu behandelnde Abbau beider Verbindungen zu Hämopyrrol.

3. **Abbau durch Reduktion.** Im allgemeinen sind Spaltungen zwischen Kohlenstoffatomen unter Addition von Wasserstoff an die Bruchstücke selten beobachtet. Reine Reduktionsspaltungen sind die des Kumarons und seiner Derivate durch Natrium und Alkohol oder Jodwasserstoff, die zwischen Sauerstoff und Kohlenstoff erfolgen. Kumaron wird hierbei in o-Aethylphenol übergeführt. In analoger Weise liefert 1-Phenylkumaron mit Natrium und Alkohol das o-Oxydibenzyl

$$
C_6H_4 \begin{array}{l} \diagup O \diagdown\!\!\diagdown \\ \diagdown \;\; C \diagup \end{array} C.C_6H_5 \quad \rightarrow C_6H_4 \begin{array}{l} \diagup OH \\ \diagdown H_2C \diagup \end{array} CH_2.C_5H_6
$$

Der Spaltung durch Reduktion verdanken wir sehr wichtige Erkenntnisse, welche die innere Natur des Blutfarbstoffes und des Blattfarbstoffes betreffen. Nencki und Zaleski konnten nämlich durch Reduktion des dem Blutfarbstoff nahestehenden Hämins und Hämatoporphyrins den Nachweis erbringen, daß die Moleküle dieser Farbstoffe Derivate des Pyrrols enthalten. Sie erhielten durch Reduktion des Hämatoporphyrins mit Jodwasserstoffsäure und Jodphosphonium eine Hämopyrrol genannte Verbindung, die α, β'-Dimethyl-β-äthylpyrrol von der Formel

$$
\begin{array}{l}
C_2H_5.C = C.CH_3 \\
\quad\quad | \quad\quad\quad \diagdown NH \\
H_3C.C = CH \diagup
\end{array}
$$

ist. O. Piloty hat durch Reduktion des Hämatoporphyrins mit Zinn und Salzsäure das Hämopyrrol in so großer Menge und Reinheit darstellen können, daß dadurch die sichere Untersuchung seiner Konstitution ermöglicht wurde. Er konnte vermittels dieses Abbaus den Beweis erbringen, daß das Hämin außer der Eisenkomponente vier und zwar nur vier Pyrrolkerne enthält und Konstitutionsformeln für Hämin und Hämatin ableiten.

Die Bildung des Hämopyrrols unter den eben genannten Bedingungen ist nicht allein für die Konstitutionsbestimmung des Blutfarbstoffes von Bedeutung, sie konnte auch sofort auf ein anderes, nicht minder wichtiges Gebiet, nämlich das des Chlorophylls, übertragen werden. Nencki und Marchlewski konnten durch Reduktion mit Jodwasserstoff und Jodphosphonium auch aus dem Phyllocyanin, einem der wichtigsten Derivate des Chlorophylls, das Hämopyrrol erhalten. Damit war ein neuer

Beweis für die engen Beziehungen des Blutfarbstoffes zum Blattfarbstoff erbracht. Es steht zu erwarten, daß die Erkenntnis von der Natur dieses Zusammenhanges eine wesentliche Förderung erfahren wird, nachdem die Untersuchung des Chlorophylls in jüngster Zeit von R. Willstätter in so glücklicher Weise in Angriff genommen worden ist, daß wir diesem Forscher schon heute eine Reihe wertvoller Aufklärungen verdanken.

Die Bedeutung der Auffindung von den nahen Beziehungen des Chlorophylls und des Blutfarbstoffes liegt in dem Hinweis auf die Stammverwandtschaft der pflanzlichen und tierischen Organismen. Von der Natur der chemischen Verbindungen der Zellen hängt ihr Stoffwechsel, von diesem ihre Form ab. Die Entdeckung der Aehnlichkeit des Chlorophylls und Blutfarbstoffes, welche so verschiedene Funktionen haben, ist daher für das Verständnis der Entwickelungsgeschichte der Organismen von großer Wichtigkeit.

Von den Spaltungen durch Reduktion sei noch die der Azo- und Hydrazokörper in Amine erwähnt. Durch kräftige Reduktionsmittel, wie Zinn und Salzsäure, werden Azokörper an der Stelle der doppelten Bindung gespalten, so daß die Komponenten in Form von primären Aminen erhalten werden, eine bequeme Methode zur Gewinnung vieler Amine und Diamine. So liefert z. B. das aus Anilin und Phenol entstehende Oxyazobenzol bei der Reduktion Anilin und p-Aminophenol

$$\underset{\text{Oxyazobenzol}}{C_6H_5.N = N.C_6H_4.OH} + 2H_2 = \underset{\text{Anilin}}{C_6H_5.NH_2} + \underset{\text{p-Aminophenol.}}{H_2N.{}_6CH_4.OH}$$

Hieraus ist zu schließen, daß bei der Bildung des Azofarbstoffes die Kuppelung an der p-Stellung zur (OH)-Gruppe des Phenols stattgefunden hat.

Beim Erhitzen mit Jodwasserstoffsäure auf 300° wird Piperidin in n-Pentan und Ammoniak zerlegt.

4. Abbau durch Hydrolyse. Man versteht darunter die Spaltung von Verbindungen in einfachere Bruchstücke unter Aufnahme von Wasser. Sie hat vortreffliche Dienste geleistet bei der Konstitutionsaufklärung kompliziert gebauter in der Natur vorkommender Verbindungen, wie z. B. der Zuckerarten, Pflanzenalkaloide und Eiweißkörper.

Die Hexobiosen $C_{12}H_{22}O_{11}$ zerfallen unter Aufnahme von Wasser in zwei Moleküle Hexosen

$$C_{12}H_{22}O_{11} + H_2O = 2\,C_6H_{12}O_6$$

Diese Hydrolyse kann außer durch Kochen mit verdünnten Säuren auch bewirkt werden durch Enzyme, wie Diastase, Emulsin, Invertin usw. So spaltet sich der Rohrzucker in je ein Molekül d-Glukose und d-Fruktose; analog zerfällt der Milchzucker in d-Glukose und Galaktose, die Maltose in 2 Moleküle d-Glukose. Bezüglich der Konstitution der Hexobiosen folgt aus diesem leichten Zerfall bei der Hydrolyse, daß sie ätherartige Anhydride der Hexosen darstellen, indem die Bindung der beiden sie zusammensetzenden Moleküle von Hexosen entweder durch die Alkohol-, oder die Aldehyd-, oder die Ketongruppe vermittelt wird. Ist bei der Verkettung der beiden Hexosemoleküle die Aldehydgruppe erhalten geblieben, so zeigen die Biosen, wie Milchzucker und Maltose, noch das für Aldosen charakteristische Verhalten, nämlich Reduktion der Fehlingschen Lösung, Osazonbildung mit Phenylhydrazin, Bildung von Karbonsäuren mit gleicher Kohlenstoffatomzahl bei der Oxydation. Dahingegen zeigt der Rohrzucker diese Reaktionen nicht und es scheinen deshalb in ihm die reduzierenden Gruppen des Trauben- und Fruchtzuckers beiderseits gebunden zu sein; also Rohrzucker = d-Glukose -d-Fruktoseanhydrid; Malzzucker = d-Glukoseanhydrid usw. Speziell beim Rohrzucker bezeichnet man die Spaltung unter Wasseraufnahme, die Hydrolyse, auch als Inversion und das hierbei erhaltene linksdrehende Gemenge als Invertzucker, weil die ursprüngliche (+) Wirkung auf das polarisierende Licht nach der Hydrolyse sich umgekehrt hat.

Die Hexotriosen $C_{18}H_{32}O_{16}$ zerfallen bei der Hydrolyse unter Aufnahme von 2 Molekülen Wasser in 3 Moleküle Hexosen

$$C_{18}H_{32}O_{16} + 2\,H_2O = 3\,C_6H_{12}O_6$$

So liefert die Raffinose die drei Hexosen d-Fruktose, d-Glukose und Galaktose.

Die höheren Polyosen oder Polysaccharide $(C_6H_{10}O_5)n$, wie Stärke, Gummi, Cellulose, werden durch Hydrolyse beim Kochen mit verdünnten Säuren oder bei Einwirkung von Enzymen ebenfalls in Monosen gespalten, und zwar treten außer Hexosen auch Pentosen auf, insbesondere bei Gummiarten, welche deshalb auch als Pentosane bezeichnet werden. Stärke (Amylym) verwandelt sich beim Kochen mit verdünnten Säuren zunächst in eine gummiartige, lösliche Substanz, Dextrin genannt, und schließlich in d-Glukose. Auch durch Diastase wird Stärke gespalten und es resultiert schließlich Maltose und Isomaltose, eine Reaktion, welche die größte Bedeutung hat für die Gewinnung von Alkohol aus Stärke.

Bei der Ermittelung der Konstitution von Alkaloiden ist eine der ersten Aufgaben die Untersuchung der Verseifbarkeit. Beim Erhitzen mit Wasser, Säuren oder Alkalien zerfallen zahlreiche Pflanzenbasen in einen stickstoffhaltigen, den eigentlichen

alkaloidischen Bestandteil, und in einen stickstofffreien. In dem letzteren liegt nur bei sehr wenigen sogenannten Glykoalkaloiden, zu welchen das Solanin zählt, ein Zucker vor, gewöhnlich eine Säure, deren Karboxyl entweder mit der basischen Gruppe oder einem alkoholischen Hydroxyl des stickstoffhaltigen Spaltungsstückes in Verbindung gestanden. So zerfällt durch Hydrolyse das Piperin in das sauerstofffreie Piperidin und die Piperinsäure; die Bindung beider ist die eines Säureamids

$$\begin{matrix}(C_5H_{10})N \\ H\end{matrix} + \begin{matrix}CO - C_{11}H_9O_2 \\ OH\end{matrix} =$$

$$\underset{\text{Piperidin}}{C_5H_{10}NH} + \underset{\text{Piperinsäure}}{HOCO - C_{11}H_9O_2}$$

Atropin läßt sich in Tropasäure und das Alkam Tropin spalten. Diese Zerlegung ist nichts anderes als die Verseifung eines Esters in Säure und Alkohol (basischen Alkohol) und verläuft nach der Gleichung

$$\underset{\text{Atropin}}{C_{17}H_{23}NO_3} + H_2O = \underset{\text{Tropin}}{C_8H_{15}NO} + \underset{\text{Tropasäure}}{C_9H_{10}O_3}$$

Die der Gleichung entgegengesetzte Reaktion führte Ladenburg 1879 zur partiellen Synthese des Atropins; er konnte durch Behandeln des tropasauren Tropins mit Salzsäure das Atropin regenerieren.

Die Hydrolyse ist auch jene Reaktion, die von den verschiedenen Abbaumethoden, die bisher auf die Proteine angewandt worden sind, die bemerkenswertesten Resultate geliefert hat. Sie führt durch verschiedene Zwischenglieder (Albumosen, Peptone) hindurch schließlich zu den Aminosäuren. Man kann daraus schließen, daß in den Aminosäuren wahre Bestandteile der Proteine vorliegen. Die Hydrolyse läßt sich mittels Säuren oder Alkalien, sowie mit Hilfe von Fermenten durchführen. Die Säuren führen am raschesten zu den Endprodukten der Spaltung, den Aminosäuren, Alkalien wirken langsamer, der Abbau durch Fermente ist der mildeste und ergibt zunächst die Zwischenprodukte Albumosen und Peptone. Am glattesten gelingt die Hydrolyse durch Erhitzen der Eiweißkörper mit rauchender Salzsäure oder auch mit 25prozentiger Schwefelsäure. Als Spaltstücke lassen sich hierbei zahlreiche Aminosäuren gewinnen, die nach der Methode von E. Fischer verestert, durch fraktionierte Destillation der Ester getrennt und durch Verseifung der letzteren in reinem Zustande gewonnen werden können. Man erhält im wesentlichen aus allen Proteinen dieselben Aminosäuren, aber in verschiedenem Mengenverhältnis. Es sind bisher folgende Aminosäuren isoliert worden: Glykokoll, Alanin, Phenylalanin, Aminoisovaleriansäure (Valin), Leucin, Isoleucin, Serin, Thyrosin, Asparaginsäure, Glutaminsäure, Lysin, Arginin, Diaminotrioxydodekansäure, Cystein, Cystin, Pyrrolidin-2-karbonsäure (Prolin), Oxypyrrolidin-2-karbonsäure (Oxy-Prolin), Tryptophan. Von diesen allen überwiegt das Leucin bei weitem.

Von besonderer Wichtigkeit ist die Spaltung der Proteine durch die Fermente des Verdauungstraktus. Es sind dabei die Resultate gemeint, welche bei der künstlichen Verdauung, d. h. bei der Verdauung von Eiweißkörpern außerhalb des Magendarmkanals durch die beiden proteolytischen Fermente Pepsin und Trypsin erhalten wurden. Grössere derartige Versuchsreihen wurden von E. Fischer und von E. Abderhalden durchgeführt. Hierbei entstehen nicht sofort Aminosäuren, sondern kompliziertere Produkte, welche noch viel vom Charakter der Eiweißstoffe zeigen, nämlich zunächst die Albumosen, aus denen dann die Peptone hervorgehen. Sie sind Zwischenprodukte der vollständigen Hydrolyse, und zwar stehen die Albumosen den Proteinstoffen, die Peptone den Aminosäuren näher. Die letzten Spaltungsprodukte bei der Einwirkung von Trypsin sind wieder Aminosäuren, und es ist anzunehmen, daß zwischen Peptonen und Aminosäuren die auf synthetischem Wege zugänglichen Polypeptide auftreten. Der fermentative Abbau der Proteine ist also ein stufenweiser und kann etwa durch das Schema

Eiweiß → Albumosen → Peptone → Polypeptide → Dipeptide → Aminosäuren

dargestellt werden. Die leichte Entstehung der Aminosäuren bei der pankreatischen Spaltung des Eiweiß läßt schließen, daß sie seine wirklichen Bestandteile sind.

Von der Vorstellung ausgehend, daß die Aminosäuren im Eiweiß durch amidartige Verkettung aneinander gereiht sind, stellte E. Fischer, wie im Artikel „Synthese" dargelegt ist, die Polypeptide synthetisch her und fand, daß sie zum Eiweiß in Beziehung stehen. Bei vorsichtig geleiteter Spaltung von Proteinen konnten dann wohlcharakterisierte, vorher auf synthetischem Wege dargestellte und genau studierte Polypeptide dargestellt werden, z. B. Glycyl-d-Alanin $H_2N.CH_2.CO.NH.CH(CH_3)COOH$, Glycyl-l-Leucin, Glycyl-Tyrosin usw.

Man kann also sagen, daß die Vermutung von E. Fischer und anderen Forschern, in den Proteinmolekülen seien die Aminosäuren amidartig verkettet, volle experimentelle Bestätigung erhalten hat.

5. Abbau mit Hilfe der Zinkstaubdestillation, der Alkalischmelze, der Er-

hitzung mit Brom. Eine weitere Methode zur Konstitutionserforschung kompliziert gebauter Verbindungen liegt im durchgreifenden Abbau mit Hilfe der Zinkstaubdestillation, der Alkalischmelze, der Erhitzung mit Brom und anderer ganz energischer Prozesse, bei denen oft unter Wasserstoffentziehung, mitunter auch unter Zertrümmerung des Moleküls, eine beständige Muttersubstanz herausgeschält wird. So z. B. beruht die Konstitutionsaufklärung des Krappfarbstoffs Alizarin auf der Beobachtung von Graebe und Liebermann (1865), daß bei dessen Zinkstaubdestillation der Kohlenwasserstoff Anthracen entsteht. Als Hauptprodukt der Zinkstaubdestillation des Morphins isolierten Vongerichten und Schrötter das Phenanthren und es folgte daraus, daß die wichtigsten Opiumalkaloide Morphin, Kodein und Thebain Phenanthrenderivate sind. Bei der Destillation mit Alkali gewann Gerhardt schon im Jahre 1842 aus Cinchonin das Chinolin. Daraus folgte, daß die Chinaalkaloide Chinin und Cinchonin Abkömmlinge des Chinolins sind.

6. Erschöpfende Methylierung. Eine sehr elegante und häufig angewandte Abbaumethode für zyklische Basen ist die „erschöpfende Methylierung", worunter man im weitesten Sinne den Zerfall von Ammoniumoxydhydraten in der Hitze oder die Zerlegung quaternärer Ammoniumsalze durch Alkalien versteht. Diese Reaktionsfolge, welche zum ersten Male von A. W. Hofmann beim Piperidin experimentell durchgeführt, von Ladenburg richtig gedeutet und dann von anderen Forschern bei einer großen Zahl von zyklischen Basen angetroffen worden ist, hat eine klassische Grundlage für die Erforschung der Konstitution der meisten Pflanzenalkaloide gebildet. Sie besteht beim Piperidin in folgendem: Das Piperidin kann als sekundäre Base mittels Jodmethyl am Stickstoff methyliert werden. Das so gewonnene Methylpiperidin vereinigt sich mit Jodmethyl zum Dimethylpiperylammoniumjodid und durch Behandeln desselben mit feuchtem Silberoxyd entsteht Dimethylpiperylammoniumhydroxyd. Das letztere spaltet bei der trockenen Destillation Wasser ab unter Bildung einer Verbindung von der Zusammensetzung des Dimethylpiperidins, welche rationell als Δ_4-Pentenyldimethylamin oder Butallylkarbin-dimethylamin zu bezeichnen ist. Auch diese Verbindung vereinigt sich als tertiäre Base mit Jodmethyl, und das aus diesem Jodid gewonnene Ammoniumhydroxyd zerfällt bei der Destillation in Trimethylamin, Wasser und einen Kohlenwasserstoff der Formel C_5H_8, den Hofmann Piperylen nannte

CH_2; H_2C, CH_2; H_2C, CH_2; N; CH_3 — Methylpiperidin

CH_2; H_2C, HC_2; H_2C, HC_2; N; H_3C, HC_3, OH — Methylpiperidin-methylhydroxyd →

CH_2; HC, H_2C; H_2C, CH_2; N; C_3H, CH_3 — Δ_4-Pentenyl-dimethylamin →

CH_2; HC, CH_2; H_2C, CH_2; N; H_3C, CH_3, CH_3, OH → CH; HC, CH; H_2C, CH_3 + $N(CH_3)_3$ + H_2O — Piperylen-α-Methylbutadien

Bei der erschöpfenden Methylierung der Alkaloide korrespondieren die Prozesse meistens genau mit diesem Abbau des N-Methylpiperidins zum Piperylen. Die Alkaloide enthüllen somit dabei ihr Kohlenstoffgerüst in Form von ungesättigten Kohlenwasserstoffen. Da diese Spaltungsmethode sich nun auf Alkaloide mit allen erdenklichen Funktionen im Molekül, und, was eine besonders wichtige Kombination bedeutet, auch auf die durch Oxydation der Alkaloide gebildeten Aminosäuren übertragen läßt, so führt sie zu einer großen Zahl von stickstofffreien, mehrfach ungesättigten Abbauprodukten, Kohlenwasserstoffen, Ketonen, Aldehyden, Carbonsäuren u. a. Für die Ermittelung der Struktur von Alkaloiden ist die Methode deshalb von großem Nutzen, weil man häufig die ungesättigten Produkte der erschöpfenden Methylierung durch glatte Reaktionen, am einfachsten durch Reduktion, in Verbindungen von bekannter Konstitution überführen kann. So entstand aus der dem Atropin nahe stehenden Tropinsäure bei erschöpfender Methylierung eine Diolefindicarbonsäure $C_7H_8O_4$, die sich weiterhin durch Hydrierung mit Natriumamalgam in die normale Dicarbonsäure mit sieben Kohlenstoffatomen, Pimelinsäure, umwandeln läßt. Es folgt daraus, daß das Kohlenstoffskelett im Atropin und Kokain eine unverzweigte Reihe von 7 Kohlenstoffatomen aufweist, und zwar in ringförmiger Anordnung, da die Tropinsäure ihre Entstehung einer Ringsprengung verdankt. Das nämliche

Prinzip ermöglicht es auch, diesen Cykloheptanring in der Form seines Ketones, des Suberons, unversehrt aus dem Kokain und Atropin herauszuschälen. Die Bedeutung dieser Methode der erschöpfenden Methylierung und der Reduktion der entstehenden Abbauprodukte zu gesättigten Verbindungen reicht über die Konstitutionsermittelung der Alkaloide weit hinaus, da häufig eine Verfolgung dieses Weges in umgekehrter Richtung zur Synthese der Alkaloide führt.

7. Aufspaltung zyklischer Basen mit Hilfe von Phosphorhaloiden. Große Bedeutung, wiederum insbesondere auf dem Gebiete der Alkaloidchemie, scheint ferner zu erlangen die Aufspaltung zyklischer Basen mit Hilfe von Phosphorhaloiden. Diese Methode ist erst in jüngster Zeit von J. v. Braun ausgearbeitet worden. Sie führt zu halogenhaltigen Verbindungen mit offener Kohlenstoffkette. Man geht dabei von den Acidylverbindungen der sekundären zyklischen Amine aus, im allgemeinen von den am leichtesten und billigsten zugänglichen Benzolderivaten dieser Basen. Es resultieren, indem das Stickstoffatom entweder einseitig von dem Kohlenstoffskelett des Ringes getrennt wird, Imidhaloide mit halogensubstituierten Alkylresten am Stickstoff $R_1.C(Hal):N.R.Hal$, die weiterhin in Acidylverbindungen primärer, halogensubstituierter Amine, $R_1.CO.NH.R.Hal$, und schließlich in die halogensubstituierten Amine $NH_2.R.Hal$ übergehen, oder auch sie führt, indem der Stickstoff aus dem Ringe ganz herausgelöst wird, zu Dihalogenverbindungen Hal.R.Hal mit offener Kette. Wir wollen sie hier am Piperidin erörtern. Die Acidylderivate des Piperidins, z. B. Benzoylpiperidin, können mit Hilfe von Phosphorpentachlorid oder Phosphorpentabromid sehr leicht aufgespalten werden. Es entsteht dabei unter gewissen Versuchsbedingungen 1,5-Dichlorpentan oder 1,5-Dibrompentan in so glatter Ausbeute, daß diese Spaltungsreaktion als Darstellungsmethode für die genannten Halogenverbindungen benützt werden kann

$$\begin{array}{ccc} & CH_2 & \\ H_2C & & CH_2 \\ H_2C & & CH_2 \\ & N & \\ & CO\cdot C_5H_6 & \end{array} \rightarrow \begin{array}{ccc} & CH_2 & \\ H_2C & & CH_2 \\ H_2C & & CH_2 \\ & N & \\ & CBr_2\cdot C_6H_6 & \end{array}$$

Benzoylpiperidin — Zwischenprodukt

$$\begin{array}{ccc} & CH_2 & \\ H_2C & & CH_2 \\ H_2C & & CH_2 \\ Br & & Br \end{array} + NCC_6H_5 + POBr_3$$

1,5-Dibrompentan — Benzonitril

Die Reaktion dürfte nicht nur bei der Lösung von Konstitutionsfragen gute Dienste leisten, sondern eröffnet auch den Weg zur leichten Synthese einer ganzen Schar von Verbindungen, die bisher teils nur schwer, teils überhaupt nicht zugänglich waren.

8. Aufspaltung zyklischer tertiärer Amine mit Hilfe von Bromcyan. Der Halogenphosphor-Aufspaltung zyklischer Basen stellt sich in ihrem Endeffekt die Aufspaltung zyklischer tertiärer Amine mit Hilfe von Bromcyan zur Seite. Wie wiederum J. v. Braun festgestellt hat, werden zyklische tertiäre Basen X ◇ N.R durch Bromcyan — falls nicht ein Austritt des Alkyls R aus dem Molekül stattfindet — der Erwartung gemäß nach der Gleichung

$$X \diamond N.R + BrCN = Br.X.N \begin{matrix} R \\ CN \end{matrix}$$

zu einem gebromten Cyanamid Br.XN(CN).R aufgespalten. Da ein solches Cyanamid weiterhin durch Verseifung in ein gebromtes sekundäres Amin Br.X.NH.R übergehen kann, so erscheint diese Abbaumethode als eine glückliche Ergänzung der Halogenphosphoraufspaltung, da nunmehr die Aufspaltung einer jeden tertiären Base X ◇ N.R mit Hilfe von Bromcyan und Halogenphosphor als möglich erscheint: entweder es wird der Base mit Bromcyan R entzogen und das nach der Verseifung des Cyanamids X ◇ N.CN resultierende sekundäre Amin X ◇ NH mit Halogenphosphor in eine offene Verbindung verwandelt, oder es findet mit Bromcyan sofort eine Aufspaltung des Ringes statt. Da diese Aufspaltung bloß in einer Phase verläuft, so ist sie als die einfachere zu betrachten, ja sie erscheint — zumal sie überraschend glatt verläuft — als die einfachste aller bisher bekannten Aufspaltungen stickstoffhaltiger Ringe und läßt sich auch dort anwenden, wo, wie z. B. bei aromatischen Piperidinderivaten, die „erschöpfende Methylierung" nach Hofmann zu Verbindungen mit offenem Bau sich nicht durchführen läßt.

Literatur. ***R. Stoermer,*** *Die Oxydations- und Reduktionsmethoden der organischen Chemie, Leipzig 1909.* — ***C. Harries,*** *Ueber die Einwirkung des Ozons auf organische Verbindungen, Annal. d. Chem. 1910 Bd. 374 S. 288.* — ***W. Küster,*** *Ueber die Konstitution der Hämatinsäuren, Annal. d. Chem. 1900 Bd. 315 S. 174.* — ***L. Marchlewski,*** *Die Chemie der Chlorophylle, Braunschweig 1909.* — ***R. Willstätter und Y. Asahina,*** *Oxydation der Chlorophyllderivate, Annal. d. Chem. 1910 Bd. 373 S. 227.* — ***M. Nencki und J. Zaleski,*** *Ueber die Reduktionsprodukte des Hämins durch Jodwasserstoff und Phosphoniumjodid, Ber. d. deutsch. chem. Ges., 34. Jahrg. (1901) S. 997 u. 1687.* — ***O. Piloty,*** *Ueber die Konstitution der gefärbten Komponente des Blutfarbstoffes, Annal. d. Chem. 1910 Bd. 377 S. 314.* —

E. Fischer, *Untersuchungen über Aminosäuren, Polypeptide und Proteine, Ber. d. deutsch. chem. Ges. 39. Jahrg. (1906) S. 530.* — **E. Abderhalden,** *Ztsch. für physiol. Chemie, 44. Bd. (1905) S. 265, 284.* — **J. v. Braun,** *Annal. d. Chem. 1911 Bd. 382 1 [1911].* — **J. v. Braun,** *Ueber die Entalkylierung und Aufspaltung organischer Basen mit Hilfe von Bromcyan u. Halogenphosphor. Göttingen 1909.*

J. Schmidt.

Abbe

Ernst.

Geboren am 23. Januar 1840 in Eisenach; gestorben am 14. Januar 1905 in Jena. Abbe war der Sohn eines Spinnmeisters. Schon in der Bürgerschule fielen seine ungewöhnlichen Gaben auf; auf Anregung seiner Lehrer ging er bald auf das Realgymnasium über, dessen Besuch der Fabrikherr ihm ermöglichte. Sehr jung kam Abbe auf die Universität, studierte in Jena und Göttingen und promovierte hier. Nach kurzer Tätigkeit am physikalischen Verein in Frankfurt a. M. habilitierte er sich in Jena 1863 und wurde 1870 zum außerordentlichen Professor für theoretische Physik ernannt. Von 1877 bis 1890 stand er außerdem der dortigen Sternwarte vor. Im Jahre 1875 trat der Jenaer Universitätsmechaniker Carl Zeiß an Abbe heran mit dem Anerbieten, Teilhaber seiner Firma, der Optischen Werkstätten zu werden, um die wissenschaftlichen Grundlagen zur Verbesserung des Mikroskops zu liefern. Die ihm zugewiesene Aufgabe löste Abbe auf das Glänzendste und ermöglichte eine ungeahnte Steigerung der Leistungsfähigkeit der Instrumente (vgl. den Artikel „Abbildungslehre"). Die handwerksmäßige Produktion ging bald zum Großbetrieb über, weitere optische und feinmechanische Instrumente wurden in den Betrieb einbezogen, der sich bald zu einer Weltfirma entwickelte. Da die Herstellung der optischen Instrumente in erster Linie geeignete Glassorten erforderte, wurde auf Abbes Anregung das Jenaer Glaswerk Schott und Genossen ins Leben gerufen. Nach dem Tode von Carl Zeiß (1888) und dem Austritt seines Sohnes Roderich Zeiß (1889) wurde Abbe alleiniger Besitzer und Leiter der Optischen Werkstätten, zu deren Gunsten er im selben Jahre seine Lehrtätigkeit niederlegte. Um seine sozialpolitischen Ideen zu verwirklichen und ihre Ausübung für sie Zukunft zu sichern, verwandelte Abbe das Unternehmen in eine unpersönliche Stiftung, der er den Namen seines verstorbenen Freundes gab. Am 1. Oktober 1896 trat das von Abbe geschaffene Statut der Carl-Zeiß-Stiftung in Kraft. 1903 legte Abbe aus Gesundheitsrücksichten seine Tätigkeit am Zeißwerk nieder. Es war Abbes Ziel, dem Arbeitgeber ein größeres Maß von Fürsorge für die Arbeiterschaft als Pflicht aufzuerlegen, dem Arbeiter in seinem Verhältnis zum Unternehmer soviel Unabhängigkeit zu verschaffen und durch Einräumung klagbarer Rechte zu sichern, wie die Interessen des Betriebs gestatteten. Der Betrieb sollte nicht dem Zwecke der Kapitalanhäufung dienen, daher kein persönlicher Besitzer oder eine Vielheit von Besitzern (Aktiengesellschaft). Der nach den nötigen Rücklagen usw. verbleibende Geschäftsgewinn sollte zu seinem größten Teil allgemeinen Zwecken der Wissenschaft und Wohlfahrt dienen, vor allem der Universität Jena, der Förderung allgemeiner Interessen der optischen und feinmechanischen Industrie, der Schaffung gemeinnütziger Einrichtungen; ein weiterer Teil der Ueberschüsse wird dem Personal in Form von Lohnnachzahlungen überwiesen. Wesentliche Bedeutung legte Abbe den Pensionsansprüchen bei. Da er die Pensionsleistung an das Personal als eine Entschädigung für verbrauchte Arbeitskraft ansah, übernahm er deren Aufbringung in vollem Umfang als Geschäftsverpflichtung und zog das Personal lediglich zur Leistung mäßiger Beiträge zur Witwen- und Waisenversorgung heran. Zu vergleichen sind die Gesammelten Abhandlungen von Ernst Abbe Jena 1906.

Literatur. **F. Auerbach,** *Das Zeißwerk und die Carl-Zeiß-Stiftung, 2. Aufl., Jena 1904.* — *Gedenkreden und Ansprachen bei der Trauerfeier für Ernst Abbe, Jena 1905.*

E. Drude.

Abbildungslehre.

Abbildung im Sinne der Wellenlehre.

1. Einleitung. 2. Punktweise Abbildung im Sinne der Wellenlehre. 3. Erweiterung der Abbildungsgrenzen bei zentrierten Systemen. 4. Strahlenbegrenzung. 5. Lichtwirkung optischer Systeme. 6. Abbildungsgesetze für nichtselbstleuchtende Objekte. 7. Experimentelle Prüfung der Abbeschen Theorie.

1. Einleitung. Der Artikel „Abbildungslehre" bildet die Fortsetzung des Artikels „Linsensysteme", in dem gezeigt ist, daß in einem zentrierten System von brechenden oder spiegelnden Kugelflächen eine punktweise Abbildung stattfindet, wenn die Abbildung vermittelt wird durch Nullstrahlen. Diese bilden so kleine Winkel u mit der Systemachse, daß $\sin u = u$ und $\cos u = 1$ gesetzt werden kann. Ein zentriertes System von Kugelflächen verwirklicht eine punktweise Abbildung also nur in einem unendlich dünnen, rings um die Systemachse gelegenen, fadenförmigen, zylindrischen Raum (Gausssche Abbildung).

Welche Bedeutung hat diese Gausssche Abbildung für die praktische Optik? Da bei ihr nur Nullstrahlen wieder punktweise vereinigt werden, so würde die Lichtintensität im Bildpunkte zu gering sein, selbst wenn die Annahme richtig wäre, daß immer da, wo Strahlen sich schneiden, auch eine punktweise Lichtkonzentration vorhanden wäre. Das ist aber ebensowenig der Fall, wie die andere Prämisse zutrifft, auf der sich die geometrische Optik aufbaut, daß den Lichtstrahlen als von-

einander unabhängigen geometrischen geraden Linien eine Realität zukommt.

Daß das Licht sich unter Umständen nicht geradlinig ausbreitet, sondern „um die Ecke geht", lehrt die Beugung des Lichtes. Und daß da, wo Lichtstrahlen sich schneiden, nicht notwendig vermehrte Intensität auftritt, geht aus der Interferenz des Lichtes hervor, gemäß welcher Licht zu Licht gehäuft sogar Dunkelheit erzeugen kann.

Schließlich wird bei der Gaussschen Abbildung stillschweigend vorausgesetzt, daß die Objekte aus lauter selbstleuchtenden Objektpunkten bestehen. Diese Bedingung ist nur bei Abbildung von Flammen, glühenden Körpern usw, kurz bei der Abbildung von Lichtquellen erfüllt. Meist hat man es in der Praxis aber mit nichtselbstleuchtenden Objekten zu tun, die ihre Strahlung erst auf indirektem Wege erhalten, also mit „erborgtem" Lichte strahlen. Die im Artikel „Linsensysteme" hergeleiteten Abbildungsgesetze haben für nichtselbstleuchtende Objekte keine strenge Gültigkeit.

In diesem Artikel haben wir also zunächst zu erörtern, welche physikalische Realität der Gaussschen Abbildung zukommt d. h. ob da, wo ein zentriertes System brechender Kugelflächen ein homozentrisches Nullstrahlenbüschel vereinigt, auch wirklich ein Bildpunkt entsteht.

Diese Aufgabe ist identisch damit, die Abbildung im Sinne der Wellenlehre des Lichtes zu betrachten. Nur sofern die Gesetze der geometrischen Optik durch die Wellenlehre gestützt werden, kommt ihnen eine physikalische Realität zu; andernfalls sind es papierne Regeln und Gesetze ohne physikalische Bedeutung, ohne realen Inhalt.

Sodann müssen wir erörtern, ob und unter welchen Bedingungen die Prämisse der Gaussschen Abbildung fallen gelassen werden kann, daß die abbildenden Strahlenbüschel unendlich kleine Winkel mit der Systemachse einschließen müssen. Es führt dies zur Erörterung einer Erweiterung der Abbildungsgrenzen.

Schließlich sind die Gesetze der Abbildung nichtselbstleuchtender Objekte abzuleiten, die speziell bei der mikroskopischen Abbildung eine große Rolle spielen.

2. Punktweise Abbildung im Sinne der Wellenlehre.[1]) 2a) Bedingungen für die Gültigkeit der geometrischen Abbildungsgesetze. Nur in den Fällen, in denen die viel kompliziertere Wellentheorie zum gleichen Resultat führt wie die geometrische Optik, kann diese als die einfachste und verständlichste Erklärungsform der Abbildungserscheinungen benutzt werden.

Die hier zu erörternde Frage lautet also: Welches sind die Voraussetzungen, auf Grund deren die Wellentheorie die Vorstellung von der Entstehung optischer Bilder gemäß der geometrischen Optik deckt und rechtfertigt?

Im Sinne der Wellenlehre ist ein leuchtender Punkt das Zentrum einer Aethererschütterung, welche sich in Form kugelförmiger Wellen in das umgebende Medium fortpflanzt. Ein Strahlenbüschel ist ein kegelförmig begrenzter Teil der Kugelwelle. Die Gestalt der fortschreitenden Welle — die Wellenfläche zu einer gewissen Zeit — ist auf dem ganzen Wege bestimmt durch den geometrischen Ort der Endpunkte aller Wege, denen vom Lichtpunkte oder von irgendeiner vorangehenden Wellenfläche aus gemessen, eine gleiche optische Länge zukommt. Auf der diese Endpunkte verbindenden Wellenfläche besteht ein übereinstimmender Oszillationszustand mit endlicher Amplitude. In dem System der einander folgenden Wellen stellen jene Wege die senkrechten Schnittlinien zu den sämtlichen Wellenflächen dar.

Solange die Bewegung innerhalb des ursprünglichen homogenen und isotropen Mediums bleibt, in welchem der Lichtpunkt sich befindet, sind die Wellenflächen konzentrische Kugelflächen und die Schnittlinien gerade Linien. Soll der Wellenfläche eine andere Lage oder Gestalt gegeben werden, so müssen die Fortpflanzungsbedingungen geändert werden. Bei der Spiegelung und Brechung ist solches der Fall. Je nachdem dann die Fortpflanzungsbedingungen sich plötzlich oder stetig ändern, werden die Schnittlinien gebrochene oder krumme Linien, und die Wellenfläche nimmt plötzlich oder stetig eine andere Lage oder Gestalt an. Bei der Abbildung von leuchtenden Objekten sollen die von jedem Punkte ausgehenden Strahlen wieder in einem Punkte konzentriert werden. Die Systeme spiegelnder oder brechender Flächen müssen demnach kugelförmige Wellen umgestalten in wieder kugelförmige Wellen mit anders gelegenem Zentrum. Wandelt das optische System konvexe Kugelflächen in konkave

[1]) Bei der Behandlung dieses Themas halte ich mich an vielen Stellen fast wörtlich an eine von E. Abbe gegebene Darstellung in einem leider nicht publizierten Werke, dessen erste sechs Bogen mir seinerzeit von Professor Abbe gütigst zur Verfügung gestellt worden sind (vgl. auch O. Lummer, Die Lehre von der strahlenden Energie. In Müller-Pouillets Lehrbuch der Physik II. Bd. III. Buch 10. Auflage, Verlag v. Fr. Vieweg und Sohn, Braunschweig 1909).

um, so entsteht ein reeller Bildpunkt im Zentrum der konkaven Kugelfläche. Was die geometrische Optik „Lichtstrahlen" nennt, sind jene senkrechten Schnittlinien der Wellenflächen. Eine physische Bedeutung kommt aber diesen Lichtstrahlen nur insoweit zu, als es wahr ist, daß der Bewegungszustand an irgend einer Stelle eines solchen Strahles völlig bestimmt ist durch die Bewegungszustände, welche sukzessive an allen vorangehenden Punkten desselben Strahles bestanden haben, also unabhängig bleibt von den Bewegungszuständen auf dem Wege anderer Strahlen. Bei der Ableitung der geradlinigen Fortpflanzung aus dem Fresnel-Huygensschen Prinzip (siehe „Wellenausbreitung"), erkennt man, daß diese Unabhängigkeit nur für einen Strahl zutrifft, welcher im Inneren des Strahlenkegels liegt, also überall in beträchtlicher Entfernung von den Grenzen des Wellenzuges bleibt, dem er angehört. Also eine gewissermaßen „reale" Existenz hat der Lichtstrahl nur im Inneren eines Strahlenbündels von endlichem Divergenzwinkel. Sobald er als einzelner Strahl erfaßt oder physisch isoliert werden soll, hört er auf zu sein.

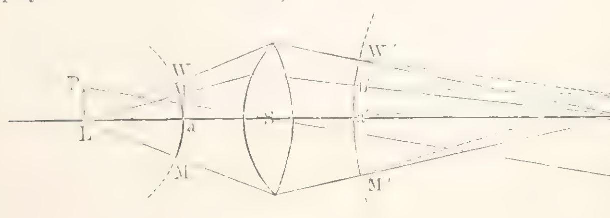


Fig. 1.

Wir gehen jetzt auf die durch ein zentriertes System brechender oder spiegelnder Kugelflächen bewirkte Abbildung näher ein. Das Charakteristische daran ist, daß ein solches System kugelförmige Wellen in wieder kugelförmige Wellen mit anders gelegenem Zentrum umwandelt. Es vereinige das System S (Fig. 1) alle vom Achsenpunkte L ausgehenden Strahlen den geometrischen Gesetzen gemäß in einem reellen, wieder auf der Achse gelegenen Punkte L'. Nach den Sätzen von Helmholtz erfüllt also das System unter dem Gesichtspunkte der Wellenlehre betrachtet, die Bedingung, daß im Punkte L' alle von L aus verfolgten Lichtwege mit gleicher optischer Länge zusammentreffen. Schlagen wir um L und L' als Zentrum die Kugelfläche MW und M'W', so stehen diese senkrecht auf den kürzesten Wegen; die optischen Längen der in das Bildmedium führenden kürzesten Wege zwischen der Kugelfläche WM und der Kugelfläche W'M' sind einander gleich, so daß also alle die um L' als Zentrum beschriebenen Kugelflächen zugleich Wellenflächen der in das Bildmedium übergegangenen Bewegung darstellen. Es ist dies eine Folge der ungleichen Fortpflanzungsverhältnisse, die auf den verschiedenen Wegen aa', bb' innerhalb des optischen Systems bestehen.

Die von L ausgegangene Welle wird begrenzt in Figur 1 vom Rande der Linse, im Bildmedium also von denjenigen Teilen W'M' der mit L' konzentrischen Kugeloberflächen, welche von den letzteren durch das austretende Strahlenbüschel ausgeschnitten werden. Wir können demnach die von L durch Vermittelung des optischen Systems S auf irgendeinen Punkt o des Bildmediums übertragene Bewegungswirkung ersetzen durch die Wirkung der Wellenfläche W'M' und letztere berechnen nach dem Fresnel-Huygensschen Prinzip durch die Interferenz aller von den Punkten der Welle W'M' kommenden Elementarwellen. Im Zentrum L' der Welle W'M' treffen alle die von ihr ausgehenden Elementarwellen zufolge der gleichen Weglängen a' L', b' L' usw. mit gleicher Phase zusammen und summieren sich einfach, während in jedem anderen Punkte o infolge der ungleichen Wege a' o, b' o usw. das Zusammentreffen mit verschiedener Phase erfolgt, und eine wenigstens teilweise Vernichtung der Bewegung durch Interferenz eintritt. Im Punkte L' erreicht die resultierende Amplitude ein absolutes Maximum, welches proportional ist der Fläche W'M', so daß die Lichtintensität in L' proportional ist dem Quadrate der Fläche W'M'.

Es ist Aufgabe der Interferenz- und Beugungstheorie, die Art der Lichtverteilung im Bildraume zu berechnen (siehe „Lichtinterferenz" und „Lichtbeugung"). Hier genügt das Resultat, daß bei kreisförmiger Begrenzung der Welle W'M' die Lichtverteilung in der Mittelpunktsebene sich als ein helles, kreisrundes Scheibchen bei L' darstellt, welches von abwechselnd dunkeln und hellen Ringen von schnell abnehmender Intensität umgeben ist. Jede andere Art der Begrenzung des Strahlenkegels bringt bei L' eine andere Abstufung des Lichteffektes hervor, die stets dem Fraunhoferschen Beugungsspektrum eines leuchtenden Punktes für die betreffende Oeffnung ähnlich ist. Je größere Ausdehnung die wirksame Fläche der Kugelwelle (also die Oeffnung des Systems S) erhält, desto rascher erfolgt bei jeder Form der Begrenzung der Intensitätsabfall um den Punkt L' herum, desto mehr reduziert sich demnach die ganze beleuchtete Fläche in der Mittelpunktsebene auf ein verschwindend kleines Flächenelement um L' herum, in welchem die ganze lebendige Kraft

des strahlenden Lichtpunktes P, die vorher auf den verschiedenen Wellenflächen ausgebreitet war, wieder zusammenströmt. So entsteht der zu L gehörige Bildpunkt L′ als die ideelle Grenze, welcher sich die resultierende Lichtverteilung in der Mittelpunktsebene der aus dem optischen System S austretenden Kugelwelle in dem Maße nähert, wie die wirksame Wellenfläche größere Ausdehnung gewinnt: Die physische Optik kennt keinen anderen Begriff von Bildpunkt. Man nennt schlechtweg den Einfluß der Begrenzung auf den Lichteffekt in der Gaussschen Bildebene L′P′ die Beugungswirkung der Oeffnung.

Selbst wenn also ein optisches System das von einem Objektpunkte ausgehende Strahlenbüschel so bricht oder spiegelt, daß es wieder in einem Punkte vereinigt wird, so ist daselbst in Wirklichkeit kein Lichtpunkt, sondern ein Licht fleck. Um die geometrischen Gesetze mit denen der Wellentheorie in Einklang zu bringen, bedarf es daher noch der jedesmaligen Bestimmung des Beugungseffektes der wirksamen Oeffnung des abbildenden Systems und der Substitution dieses Beugungseffektes an Stelle des geometrischen Lichtpunktes. In der geometrischen Optik faßt man also fälschlicherweise den Bildpunkt als das Primäre im Abbildungsvorgange auf, jedenfalls als ein selbständiges Element in demselben. Die Bestimmung des Beugungseffektes der Oeffnung des Systems wird nachträglich abgemacht, als ob es gälte, gleichsam ein „störendes“ Nebenphänomen abzutun. Das ist auch vom mathematischen Standpunkte aus erlaubt; in Wirklichkeit ist es umgekehrt. Der Bildpunkt ist die Folge der Beugungsfigur. Ohne Beugungsfigur kann niemals ein Bildpunkt entstehen, da er ja nur die ideelle Grenze der ersteren ist. Man kann also auch nur in den Fällen der geometrischen Optik von Bildpunkten reden, wo das Oeffnungsverhältnis (Querschnitt dividiert durch den Abstand vom Mittelpunkte) der abbildenden Strahlenkegel genügend groß ist. Bei der Gaussschen Abbildung muß das Oeffnungsverhältnis jedoch sehr klein sein. Wir werden in den nächsten Abschnitten sehen, welche Mittel es gibt und welche Bedingungen erfüllt sein müssen, damit durch ein zentriertes System auch weitgeöffnete Strahlenbüschel wieder in einem Punkte vereinigt werden; erst dann deckt sich das Resultat der geometrischen Optik nahe mit dem der physischen Optik: es reduziert sich das Beugungsscheibchen auf einen Lichtpunkt. Aber erwähnt sei gleich hier, daß, wenn sich laut geometrischer Strahlentheorie die Lichtstrahlen nicht in einem Punkte schneiden, die dann stattfindende wirkliche Lichtverteilung sich nicht durch die Konstruktion der geometrischen Strahlen finden läßt, sondern einzig und allein durch Aufsuchen der Wellenfläche im letzten Medium und durch Berechnung der Interferenzwirkung aller von ihr ausgehenden Elementarwellen. Wenn, wie bei einer einzigen brechenden Kugelfläche, sphärische Aberration auftritt, so heißt das nichts anderes, als daß die vom Lichtpunkte kommende Kugelwelle beim Uebertritt in das letzte Medium in eine von der Kugel abweichende Rotationsfläche übergeht. In diesem Falle gibt es keinen Punkt, in dem sich alle Elementarwellen summieren. Soll eine punktweise Abbildung stattfinden, so muß man das abbildende System so wählen oder korrigieren, daß die austretende Wellenfläche eine Kugelwelle ist und eine große Oeffnung hat. Aber diese Kugelwelle muß außerdem zugleich Wellenfläche sein und interferenzfähige Elementarwellen aussenden. Diese Bedingung lautet anders ausgedrückt: Der Objektpunkt muß kohärente Strahlen aussenden, er muß also selbstleuchtend sein.

2b) Abbildung selbstleuchtender Objekte. Es sei außer dem Achsenpunkte L (Fig. 1) noch ein zweiter, seitlich gelegener Lichtpunkt P vorhanden. Auch von ihm erzeuge das System S einen Bildpunkt in P′, indem es alle von P ausgehenden Strahlen nach dem Punkte P′ breche. Dann ist auch für diesen Punkt P die Bedingung erfüllt, daß er Kugelwellen aussendet, welche durch das optische System S wiederum in Kugelwellen mit anders gelegenem Zentrum (P′) verwandelt werden.

Sind statt der zwei Punkte P und L auf der Strecke L P unendlich viele vorhanden, d. h. ist L P ein selbstleuchtendes Objekt, welches den geometrischen Gesetzen gemäß punktweise vom System S im Bilde L′ P′ abgebildet wird, so gilt für jeden einzelnen Punkt und sein Bild das oben für L und L′ oder P und P′ Gesagte. Die physische Optik rechtfertigt also aus ihren Prinzipien auch die Abbildung eines flächenhaften Objektes in dem Sinne, daß sie zu jedem einzelnen Objektpunkte eine gewisse, aber für alle die gleiche Lichtausbreitung in der Bildebene von L P nachweist, und diese Lichtausbreitung mit zunehmender Größe der Oeffnung auf Punkte sich reduzieren läßt.

Damit sich aber der Vorgang so abspielt, muß noch folgende Bedingung erfüllt werden: Es müssen die verschiedenen Objektpunkte voneinander unabhängige Erschütterungszentra sein. Nur in diesem Falle enthalten die den verschiedenen Objektpunkten zugehörigen Kugelwellen im Bildmedium inkohärente Bewegungszustände, so daß die von ihnen einzeln erzeugten Beugungsscheibchen sich einfach ohne gegenseitige Störung super-

ponieren. Diese Bedingung ist bei selbstleuchtenden Objekten, wie es die Flammen sind, von selbst erfüllt. Ist sie nicht erfüllt, so sind alle den verschiedenen Objektpunkten entsprechenden Kugelwellen kohärent, und die Elementarwellen nicht bloß jeder einzelnen, sondern aller dieser Kugelwellen sind untereinander interferenzfähig. Wir sind somit zu folgendem Resultat gelangt:

Die nach den Regeln der geometrischen Optik bestimmte punktweise Abbildung eines Objektes (mit nachträglichem Hinzufügen einer der Oeffnung des Systems entsprechenden Beugungsmodifikation der Bildpunkte in Form von sich superponierenden Beugungsscheibchen) steht in Uebereinstimmung mit den Grundsätzen der Undulationstheorie, falls die beiden Voraussetzungen erfüllt sind, 1. daß die von den einzelnen Objektpunkten ausgehenden Strahlenbüschel Wellenflächen sind, so daß alle Strahlen je eines Büschels in gleichem Abstande vom Zentrum zu allen Zeiten übereinstimmenden Schwingungszustand repräsentieren, und 2. daß die von benachbarten Objektpunkten ausgehenden Strahlen inkohärent sind, also voneinander unabhängigen Wellenflächen zugehören.

Die im dritten Kapitel des Artikels „Linsensysteme“ für zentrierte Systeme brechender oder spiegelnder Kugelflächen von sehr kleiner Oeffnung abgeleiteten Abbildungsgesetze gelten demnach auch in Wirklichkeit[1]) für den Fall, daß man es mit selbstleuchtenden Objekten zu tun hat, und daß man jeden Bildpunkt durch die der Begrenzung entsprechende Beugungserscheinung ersetzt.

2c) Abbildung nichtselbstleuchtender Objekte. Wir wollen jetzt den Fall betrachten, daß von einem Punkte ein Strahlenbüschel ausgeht, dessen Begrenzung keine Beugungswirkung nach sich zieht, dessen Strahlen also nicht interferenzfähig miteinander sind. Dieser Fall tritt ein, wenn, wie in Figur 2, in L sich Strahlen von allen Punkten der ausgedehnten Lichtquelle F kreuzen. Man kann sich vorstellen, daß bei L eine Wand mit sehr enger Oeffnung steht. Von dieser punktförmigen Oeffnung geht ein Strahlenbüschel aus wie von einem selbstleuchtenden Punkte, aber die Strahlen dieses Büschels sind inkohärent, da sie alle von verschiedenen Punkten der Lichtquelle F herrühren. Welches ist die Lichtverteilung im Vereinigungspunkte L′, in welchem die Strahlen gemäß dem Brechungsgesetz durch das optische System S vereinigt werden? Dazu beschreiben wir wieder um L und L′ als Zentra die Kugelflächen WM und W′M′; auch hier sind die optischen Längen aller Strahlen zwischen WM und W′M′ einander gleich; auch hier enthält die Kugelfläche W′M′ die Endpunkte aller kürzesten Wege von gleicher optischer Länge gerechnet vom Objektpunkte L aus, aber hier ist W′M′ nicht zugleich Wellenfläche, da auf ihr von Punkt zu Punkt ein anderer Schwingungszustand herrscht: von ihren Punkten gehen keine interferenzfähigen Elementarwellen aus. Diese Elementarwellen können also auch in der Mittelpunktsebene keine von der Begrenzung der Welle M′W′ abhängige Beugungswirkung, also auch im Grenzfalle keinen Bildpunkt hervorbringen. Im Falle, daß ein Objekt nur solche von der Lichtquelle transmittierten Strahlenbüschel aussendet, ist eine Abbildung im Sinne der geometrischen Optik ausgeschlossen. Findet dennoch im allgemeinen eine Abbildung nicht selbstleuchtender Objekte statt, scheinbar ganz übereinstimmend mit den Gesetzen der geometrischen Optik[1]), so muß trotzdem als Konsequenz der allgemein angenommenen Theorie des Lichtes behauptet werden, daß diese Abbildung im Prinzip verschieden ist von der Abbildung selbstleuchtender Objekte.

Die Abbesche Theorie der Abbildung nichtselbstleuchtender Objekte, speziell bei der mikroskopischen Bilderzeugung, können wir erst bringen, wenn wir die Bedingungen kennen gelernt haben, unter denen weitgeöffnete Büschel zur Vereinigung gebracht werden. Wir behandeln also zunächst noch die Abbildung selbstleuchtender Objekte.

3. Erweiterung der Abbildungsgrenzen bei zentrierten Systemen. 3a) Widerspruch zwischen geometrischer Optik und Erfahrung. Gemäß der Wellentheorie des Lichtes entsteht nur dann ein punktweises Abbild, wenn das Objekt ein Selbstleuchter ist, und das optische System Strahlenbüschel endlicher Oeffnung so bricht, daß sie im Bildraum senkrecht auf einer kugelförmigen Wellenfläche stehen (Abschnitt 2). Dieser Bedingung entsprechen nur die aberrationsfreien brechenden und spiegelnden Flächen (vgl. den Artikel „Lichtbrechung“), die sogar alle von einem Lichtpunkt ausgegangenen Strahlen wieder in einem Punkte vereinigen, in welchem tatsächlich eine punktweise Lichtkonzentration stattfindet. Leider besitzt jede aberrationsfreie Fläche aber nur ein

[1]) Wenigstens soweit die Wellentheorie des Lichtes die optischen Erscheinungen wiedergibt.

[1]) Wir werden später zeigen daß bei den mikroskopischen Abbildungen eines Gitters oder dergleichen Objekten Bilder entstehen können, welche nach der geometrischen Optik dem Objekt ähnlich sein sollten, ihm aber in Wirklichkeit ganz unähnlich sind.

aberrationsfreies Punktepaar, ist also von geringer praktischer Bedeutung.

Das zentrierte System brechender Kugelflächen andererseits vermag nur Nullstrahlenbüschel zu vereinigen, so daß statt eines Bildpunktes eine mehr oder weniger ausgedehnte Bildfläche entworfen wird. Die Gaussche Abbildung ist daher in Wirklichkeit keine punktweise Abbildung und somit ebenfalls ohne praktische Bedeutung.

Die Forderungen der Wellenlehre für eine punktweise Abbildung und die Resultate der geometrischen Optik, welche in der Gaussschen Abbildung gipfeln, stehen also in unlösbarem Widerspruche. Es sei gleich hier vorausgenommen, daß es kein optisches System brechender Flächen irgendwelcher Form gibt, welches auch nur ein Volumelement punktweise mittels beliebig weit geöffneter Büschel abbildete.

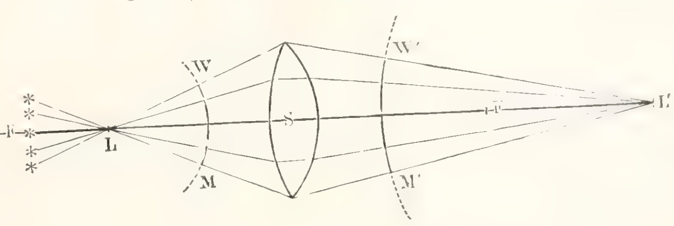


Fig. 2.

Man hilft sich daher durch Kompromisse. Zunächst kommt unser Auge zu Hilfe, insofern dieses keine genaue punktweise Abbildung erheischt, da es infolge seiner Netzhauteinrichtung doch nicht zwei genügend nahe Bildpunkte voneinander trennen kann. Dem Auge erscheint daher auch ein Lichtscheibchen von kleiner, aber endlicher Ausdehnung noch als Punkt. Auch die photographische Platte verhält sich ähnlich dem Auge, denn sie hat ein „Korn“ wie man sagt, und ist vergleichbar in ihrer Struktur unserer Netzhaut.

Ferner führt man eine Arbeitsteilung herbei, indem man die optischen Apparate wie das Mikroskop und das Fernrohr aus zwei Teilen (Objektiv und Okular) konstruiert, von denen der eine (Objektiv) wenig ausgedehnte Objekte mittels weitgeöffneter Büschel, der andere (Okular) dagegen ausgedehnte Objekte mittels enger Büschel abzubilden hat.

Nach diesen Bemerkungen allgemeinerer Art wollen wir sehen, durch welche Mittel man beim zentrierten System brechender Kugelflächen die Abbildungsgrenzen der Gaussschen Abbildung erweitern kann.

3 b) **Sphärische Aberration und ihre Bedeutung.** Zwei von einem Achsenpunkte L (Fig. 3) ausgegangene Strahlen LE und Le, von denen LE einen endlichen Divergenzwinkel U, dagegen Le einen unendlich kleinen Winkel u mit der Achse des Systems S[1]) bildet, schneiden nach ihrer Brechung die Achse in verschiedenen Punkten L und l. Die Distanz Ll zwischen den beiden Schnittpunkten wird als sphärische Longitudinal-Aberration (Längsabweichung) bezeichnet. Alle zwischen E und e auffallenden Strahlen bilden einen Teil der diakaustischen Kurve FF′ (vgl. den Artikel „Lichtbrechung“), die von allen gebrochenen Strahlen eingehüllt wird. Wir wollen den vom System S aufgenommenen äußersten Strahl LE als Randstrahl bezeichnen im Gegensatz zu dem Nullstrahl Le. Die engste Einschnürung vw des gebrochenen Büschels ist da, wo die diakaustische Kurve FlF′ von den Randstrahlen geschnitten wird; der Querschnitt vw stellt somit die Größe des kleinsten Zerstreuungskreises dar (Lateral-Aberration oder Seitenabweichung).

Bei einer spiegelnden Kugelfläche wächst der Radius des kleinsten Zerstreuungskreises proportional zur dritten Potenz der Spiegelöffnung ES.

Bei einer einzigen brechenden Fläche und für parallel auffallende Strahlen bei dünnen Linsen haben die Randstrahlen eine kleinere oder größere Vereinigungsweite als die Nullstrahlen, je nachdem die brechende Fläche oder Linse parallele

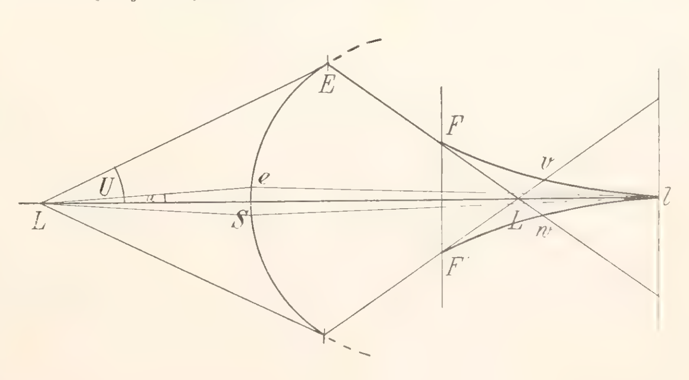


Fig. 3.

[1]) In der Figur ist der Einfachheit wegen nur eine brechende Kugelfläche gezeichnet.

Strahlen reell oder virtuell vereinigen. Schneiden die Randstrahlen die Achse näher dem System als die Nullstrahlen, so nennt man das System sphärisch unterkorrigiert; im entgegengesetzten Falle sphärisch überkorrigiert.

Hieraus erkennt man ohne weiteres, daß man durch die Kombination eines über- und unterkorrigierten Systems ein Gesamtsystem erhalten muß, dessen sphärische Aberration dem absoluten Betrage nach kleiner ist als die jedes Einzelsystems. Bei geeigneter Wahl der Einzelsysteme wird man also die sphärische Aberration ganz beseitigen können.

Im folgenden sei die Größe der sphärischen Aberration und ihre Beseitigung für einige spezielle Fälle erörtert:

1. Eine einzige brechende Kugelfläche. Starkgekrümmte Kugelflächen haben eine größere sphärische Aberration als schwach gekrümmte; bei gleicher Krümmung ist die sphärische Aberration umso kleiner je kleiner die Differenz der Brechungsquotienten der beiden Medien ist. Die sphärische Aberration ist Null, wenn der Objektpunkt mit dem Kugelmittelpunkt, mit dem Scheitel oder mit einem der beiden aberrationsfreien Punkte der Kugelfläche zusammenfällt (vgl. den Artikel „Linsensysteme").

2. Unendlich dünne Linse. Hier ist ceteris paribus die sphärische Aberration umso kleiner, je größer der Brechungsquotient des Linsenmaterials ist. Sie hängt wesentlich von der Form der Linse ab d. h. vom Verhältnis der Radien beider Flächen und ist bei gegebener Form geringer, wenn man die gekrümmtere Fläche dem ankommenden Lichte zukehrt.

3. Zwei Linsen. Bei 2 Linsen oder einem zentrierten System, welches man in seiner Wirkung durch 2 Linsen ersetzen kann, hebt man die sphärische Aberration auf folgende Weise auf. Ist die Brennweite der ersten Linse gleich φ_1, so berechnet man die zweite Linse so, daß ihre Aberration für die aus der Entfernung $1/\varphi_1$ einfallenden Strahlen ebenso groß, aber von entgegengesetztem Vorzeichen ist, wie die der ersten Linse für parallel einfallende Strahlen. Im allgemeinen ist diese Bedingung damit identisch, daß die eine Linse sammelnd, die andere zerstreuend wirkt. Es gibt unendlich viele Linsenpaare, welche bei gleicher Gesamtbrennweite aberrationsfrei sind.

4. Verminderung der Aberration einer einfachen Linse durch Anwendung mehrerer Linsen von geicher Gesamtbrennweite wie die einfache Linse. Wollte man eine einfache Linse konstruieren, welche bei großer Oeffnung eine kleine Brennweite besitzt, so würde selbst bei der günstigsten Linsenform infolge der sphärischen Aberration an eine auch nur annähernd punktweise Abbildung nicht zu denken sein. Bedeutend günstiger gestalten sich die Verhältnisse, wenn man die einfache Linse von starker Krümmung ersetzt durch mehrere Linsen schwächerer Krümmung von derselben Glassorte, derselben Form und von der Gesamtbrennweite wie die einfache Linse.

5. Beseitigung der sphärischen Aberration beim Mikroskopobjektiv (Oelimmersion). Beim Mikroskopobjektiv verwendet man Oeffnungswinkel von 180° und darüber (Oelimmersion). Um die hierbei auftretenden hohen Beträge der sphärischen Aberration zu beseitigen macht man außer von dem unter 4 genannten Mittel auch noch Gebrauch von der unter 1 erwähnten Eigenschaft einer Kugelfläche, zwei aberrationsfreie Punkte zu besitzen.

Man wählt als erste Linse eine Halbkugel mit ihrer ebenen Fläche dem Objekt zugewandt, welches man bei der Oelimmersion in ein Medium einbettet vom gleichen Brechungsindex wie die Halbkugel, und welches man möglichst in den einen aberrationsfreien Punkt der Kugeloberfläche bringt. Es treten dann die Strahlen ohne sphärische Aberration aus der Halbkugel aus, trotzdem sie auf einen viel kleineren Raum als zuvor eingeengt sind. Diese Strahlenbüschel von relativ geringer Divergenz schließlich zur Konvergenz in einen Punkt zu zwingen, gelingt dann immer, wenn man nur genügend viele brechende Kugelflächen zur Mitwirkung heranzieht.

Die durch Beseitigung der sphärischen Aberration erzielte Erweiterung der Abbildungsgrenzen bezieht sich nur auf die Objektpunkte, welche auf der Achse des Systems gelegen sind und streng genommen auch nur auf ein Punktepaar, für welches das System sphärisch korrigiert worden ist. In Wirklichkeit freilich ist, abgesehen vom Mikroskopobjektiv, ein System auch für die übrigen Punktepaare auf der Achse angenähert sphärisch korrigiert, wenn die sphärische Abweichung z. B. in bezug auf den unendlich fernen Punkt und den zugehörigen Brennpunkt streng beseitigt ist.

3c) Aplanatische Punkte. Sinusbedingung. Es sei das optische System S (Fig. 4) für den Achsenpunkt L sphärisch korrigiert, so daß das weitgeöffnete von L ausgehende Strahlenbüschel nach L′ gebrochen werde. Früher glaubte man, daß dann auch ein L benachbarter Punkt l punktweise abgebildet werde. Dies ist aber nur dann der Fall, wenn außer der vollkommenen Beseitigung der sphärischen Aberration für den Achsenpunkt L auch noch die sogenannte Sinusbedingung er-

füllt ist. In diesem Falle wird wenigstens ein bei L gelegenes Flächen e l e m e n t punktweise abgebildet, während bei nichterfüllter Sinusbedingung vom unendlich benachbarten Punkte l ein Zerstreuungskreis l′ l″ entsteht, der von gleicher Größenordnung ist L l das gleich große Bild L′ l′ entwirft, ist die Sinusbedingung.

Es muß das Sinusverhältnis konjugierter Achsenwinkel u und u′ für alle vom Achsenpunkte L ausgegangenen und zum Bildpunkte L′ gebrochenen Strahlen konstant sein.

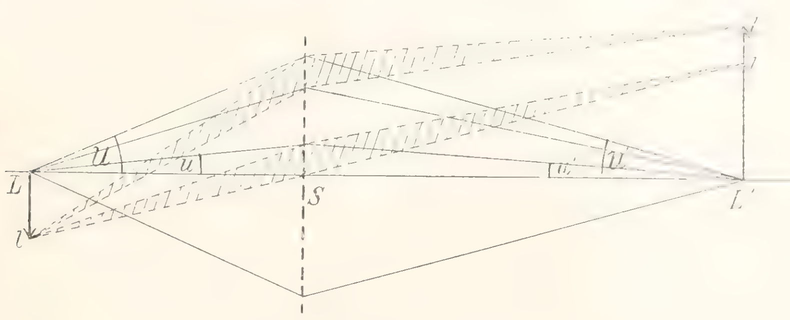


Fig. 4.

wie der Abstand l L des Objektpunktes l von der Achse. Es hat dies nach A b b e seinen Grund darin, daß die verschiedenen Partien („Zonen“) des sphärisch korrigierten Systems S von L l Bilder verschiedener Lateralvergrößerung entwerfen. In der Figur ist L′ l′ das durch die Nullzone (Nullstrahlen) entworfene Bild von L l, während die Randzone (Randstrahlen) von L l das Bild L′ l″ entwirft.

Wirken alle Zonen gleichzeitig, so entstehen diese ungleich großen Bilder alle zugleich und überlagern sich so, daß die mittleren Teile sich decken, die seitlichen übereinander hinausgreifen. Diese Differenzen zwischen der Vergrößerung des mittleren und peripherischen Teiles eines Objektivs von großer Oeffnung, z. B. eines Mikroskopobjektivs, können 50% und mehr betragen.

Solche Undeutlichkeiten wurden lange Zeit fälschlicherweise mit dem unzutreffenden Namen Wölbung des Bildes oder Unebenheit des Sehfeldes belegt; man wußte eben vor A b b e noch nicht, daß alle diese Fehler weit zurückstehen hinter dem der ungleichen Vergrößerung verschiedener Zonen eines nur sphärisch korrigierten Systems.

Wir wollen ein System als „a p l a n a t i s c h“ bezeichnen, wenn es mittelst w e i t g e ö f f n e t e r Strahlenbüschel ein axiales Flächenelement L l punktweise und ähnlich wieder als axiales Flächenelement abbildet. Die Punkte L und L′, für welche diese Bedingung erfüllt ist, heißen „a p l a n a t i s c h e“ Punkte. Damit sie aplanatische Punkte werden, muß für sie die sphärische Aberration aufgehoben und die Lateralvergrößerung aller Zonen des Systems die gleiche sein. Die notwendige und hinreichende geometrische Bedingung dafür, daß jede Zone des Systems S vom Element

Es muß also für alle konjugierten Strahlenpaare gelten

$$\frac{\sin U}{\sin U'} = \frac{\sin u'}{\sin u} = \frac{n'}{n} \cdot \frac{1}{\beta_0} = \text{const.} \quad \ldots \quad (1)$$

wo n und n′ die Brechungsquotienten des Objekt- und Bildmediums bedeuten und unter β_0 die Lateralvergrößerung im aplanatischen Punktepaar L und L′ verstanden wird, wenn lediglich die Nullzone (Nullstrahlen) die Abbildung vermittelt.

Dieses Sinusgesetz ist von großer Wichtigkeit bei der mikroskopischen Abbildung mit sehr weitgeöffneten Strahlenbüscheln geworden. Wo die Sinusbedingung nicht erfüllt und nur die sphärische Abweichung auf der Achse gehoben ist, erscheint das Bild eines ebenen Objektes wie eine von oben her gesehene Kegelspitze.

Die aplanatischen Punkte sind nicht ohne weiteres identisch mit den von uns aberrationsfrei genannten Punkten. So sind für die von dem einen Brennpunkte einer Ellipse ausgehenden und nach dem anderen Brennpunkte reflektierten Strahlen die Verhältnisse der Sinus konjugierter Achsenwinkel nicht dieselben, die Brennpunkte des Ellipsoids sind keine aplanatischen Punkte in dem A b b e schen Sinne. Wohl aber sind die aberrationsfreien Punkte einer brechenden Kugelfläche zugleich aplanatische Punkte.

Was die Aufstellung der Sinusbedingung und die Ableitung des Wertes der Konstanten betrifft, so ist sie fast gleichzeitig von A b b e und H e l m h o l t z gegeben worden. A b b e leitete sie aus der Forderung ab, daß zwei konjugierte Flächenelemente durch alle Partialbüschel mit gleicher Vergrößerung ineinander abgebildet werden.

Gleichzeitig stellte H e l m h o l t z die Konstanz des Sinusverhältnisses konju-

gierter Achsenwinkel auf als Bedingung dafür, daß alles von einem Flächenelement ausgehende und das System treffende Licht wirklich in dem Bilde vereinigt werde, welches das aberrationsfreie System nach den gewöhnlichen Regeln der geometrischen Optik (Gausssche Abbildungslehre) vom Objektelement entwirft. Er wandte also gleichsam das Gesetz von der Erhaltung der Energie auf die Lichtstrahlung an.

Viel allgemeiner hatte Clausius schon vor Helmholtz und Abbe aus dem zweiten Hauptsatze der mechanischen Wärmetheorie die Beziehung hergeleitet dafür, daß die ganze Energie von einem Flächenelement innerhalb eines unendlich kleinen Kegelwinkels auf ein anderes Element übertragen werde. Wendet man die Clausiussche Gleichung auf die Abbildung eines Flächenelementes durch ein optisches System mittels weit geöffneter Strahlenbüschel an, so erhält man die Sinusbedingung und für die Konstante denselben Wert, wie ihn Abbe und Helmholtz gefunden haben.

Einen eleganten Beweis mit Hilfe der optischen Längen hat John Hockin gegeben, während Sommerfeld und J. Runge ganz kürzlich für den Sinussatz unter Anwendung der Vektorenrechnung einen Beweis erbrachten, der im Grunde genommen mit dem von Schwarzschild gegebenen identisch ist. Den Zusammenhang des Sinussatzes mit einem allgemeineren Reziprozitätsgesetz der geometrischen Optik betont Straubel.

Eine sehr einfache Gestalt nimmt die Sinusbedingung an, wenn entweder der Objekt- oder der Bildpunkt im Unendlichen liegt. Es sei der Objektpunkt im Unendlichen gelegen (Figur 5) wie es beim Fernrohr der

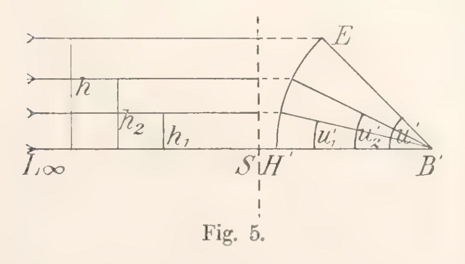


Fig. 5.

Fall ist. Dann muß für die verschiedenen achsenparallelen Strahlen, welche von dem unendlich fernen Achsenpunkte ausgegangen sind, gelten

$$\frac{h_1}{\sin u_1'} = \frac{h_2}{\sin u_2'} = \ldots \frac{h}{\sin u'} = \text{const.}$$

Für sehr kleine Werte von u_1 gilt aber

$$\frac{h_1}{\sin u_1'} \quad \frac{h_1}{\operatorname{tg} u_1'} = F'$$

wo F' die hintere Brennweite H'B' der Nullstrahlen ist.

Da gemäß Figur gilt $\sin u' = h/EB'$, so ist die Sinusbedingung identisch mit der Bedingung

$$EB' = F' = H'B'$$

d. h. die Schnittpunkte der verlängerten achsenparallelen Einfallstrahlen mit ihren konjugierten Bildstrahlen müssen auf einer Kugelfläche liegen, die um den hinteren Brennpunkt B' als Zentrum mit der Brennweite F' des Systems beschrieben ist.

Wenn die Sinusbedingung erfüllt ist, so wird ein Flächenelement mittelst beliebig weit geöffneter Büschel deutlich abgebildet, nicht jedoch eine ausgedehnte Fläche, noch auch zugleich mehrere Flächenelemente hintereinander. Es gibt demnach nur ein Paar aplanatischer Punkte, so daß ein Mikroskopobjektiv stets für dasjenige Punktepaar berechnet werden muß, für welches es gebraucht werden soll. Sowie man das Objekt aus dem aplanatischen Punkte heraus an eine andere Stelle der Achse bringt, ist sein Bild nicht mehr aplanatisch.

Aber selbst das bescheidene Verlangen, zwei verschiedene Achsenpunkte aplanatisch abzubilden, kann nicht erfüllt werden, wenn die aplanatische Abbildung eines Flächenelementes hergestellt worden ist. Denn um jenes Verlangen zu befriedigen, muß, wie Czapski nach Analogie des Hockinschen Verfahrens beweist, der Bedingung

$$\frac{\sin u/2}{\sin u'/2} = \beta_0 \frac{n'}{n} \quad \ldots \ldots (2)$$

genügt werden, welche im Widerspruch steht mit der Sinusbedingung 1) für aplanatische Systeme.

Aus beiden Bedingungen folgt, daß man mit allen Mitteln der praktischen Dioptrik sich höchstens folgendem theoretischen Ziele nähern kann, mittels beliebig weit geöffneter Büschel entweder nur ein zur Achse senkrechtes Flächenelement oder ein unendlich kleines Stück der Achse selbst deutlich abzubilden. Dagegen bleibt es praktisch unmöglich, ein unendlich kleines axiales Raumelement scharf abzubilden.

3d) Abbildung ausgedehnter Objekte mittels unendlich enger Büschel. Da es unmöglich ist, mittels zentrierter Systeme ein endlich ausgedehntes Objekt durch beliebig weitgeöffnete Büschel punktweise abzubilden, wollen wir untersuchen, ob es möglich ist, ein beliebig ausgedehntes Objekt wenigstens durch unendlich enge Büschel punktweise abzubilden. Im allgemeinen ist auch dies nicht der Fall, denn wir wissen, daß ein schiefes enges Büschel die Erscheinung des Astigmatismus zeigt (vgl. den Artikel „Linsensysteme"). Erst wenn der Astigmatismus beseitigt ist,

kann von einer punktweisen Abbildung in unserem Sinne die Rede sein. Dann entsteht zwar vom Objekt ein punktweise scharfes Abbild; dasselbe kann aber noch mit zwei Fehlern behaftet sein. der Bildwölbung und der Verzerrung. Wir wollen erörtern, wann und durch welche Mittel diese 3 Fehler zu verkleinern oder ganz zu beseitigen sind.

3e) Astigmatismus schiefer enger Büschel bei zentrierten Systemen. Wo immer ein enges Strahlenbüschel eine brechende Fläche trifft, welche in bezug auf den Achsenstrahl keine Rotationsfläche ist, bildet das gesamte schiefe, enge Büschel nach der Brechung zwei zueinander und

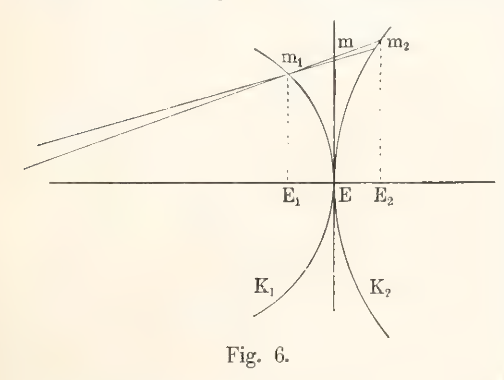


Fig. 6.

zum gebrochenen Achsenstrahl des schiefen Büschels senkrecht stehende Brennlinien m_1 und m_2 (Fig. 6). Statt eines von der Gaussschen Abbildung bei m geforderten Bildpunktes in der Bildebene E der Nullstrahlen entsteht daselbst eine kleine ausgedehnte Zerstreuungsfläche. Die astigmatische Differenz m_1 m_2 wächst mit dem Divergenzwinkel des schiefen Büschels; sie wird Null für das paraxiale Büschel (Nullstrahlenbüschel). Die den verschiedenen Objektpunkten eines ausgedehnten Objektes zukommenden Brennlinien m_1 und m_2 liegen je auf einer Fläche K_1 und K_2 und diese „Bildflächen" berühren sich im konjugierten Bildpunkt E des Objektachsenpunktes.

Wählt man in einer zur Achse senkrechten Ebene als Objekt 1. konzentrische Kreise mit dem gemeinsamen Zentrum auf der optischen Achse und 2. deren Radien, so bilden sich die Kreise auf der einen, die Radien auf der anderen Bildfläche deutlich ab. Auf der Bildebene E für Nullstrahlen entstehen weder von den Kreisen noch von den Radien deutliche Abbilder, da die astigmatischen Strahlenbüschel von ihr im allgemeinen in Ellipsen geschnitten werden, deren Flächeninhalt um so größer ist, je größer der Winkel ist, den das schiefe Büschel mit der Achse bildet. Will man also selbst bei unendlich kleiner Oeffnung des Objektivs ein großes Gesichtsfeld erzielen, so muß vor allem der Astigmatismus beseitigt sein. Es läßt sich auf theoretischem Wege kein Satz ableiten, der in gleicher Allgemeinheit, wie die Sinusbedingung für den zuerst behandelten Grenzfall, die Bedingung dafür enthielte, daß der Astigmatismus für sehr schiefe zur Achse geneigte Elementarbüschel beseitigt wäre.

Die Beseitigung des Astigmatismus oder die Herstellung des „Stigmatismus" (punktförmige Strahlenvereinigung) ist eng verknüpft mit der Beseitigung der Bildwölbung. Sind beide Fehler beseitigt, so spricht man von „anastigmatischer Bildebenung".

3f) Bildwölbung und anastigmatische Bildebenung. Je mehr das System in bezug auf Astigmatismus korrigiert ist, um so näher liegen die beiden Brennlinien m_1 und m_2 (Fig. 6) aneinander und damit auch die beiden Bildflächen K_1 und K_2, ohne aber mit der durch E gelegten Bildebene der Gaussschen Abbildung zusammenzufallen. Vielmehr bleibt das Abbild, vermittelt durch die schiefen engen Büschel, eine gewölbte Fläche, die im Punkte E die Gausssche Bildebene tangiert. Fängt man das Bild also auf einem ebenen Schirm (photographische Platte) auf, so nimmt je nach der Einstellebene, die man wählt, die Schärfe des Bildes von der Mitte zum Rande ab oder es werden alle Punkte gleichmäßig unscharf abgebildet. Nur auf geeignet gekrümmter Platte entsteht ein überall punktweises Abbild. Bei ebener Platte erhält man ein überall deutliches Abbild nur, wenn man die Objektpunkte im Raume auf geeignet gewölbter Fläche anordnet, wie man es bei Gruppenaufnahmen macht. Da beim Auge die Netzhaut bedeutend gekrümmt ist, so entsteht auf ihr also unter Umständen auch von einem ausgedehnten, ebenen Objekte senkrecht zur Augenachse ein deutliches Abbild.

Petzval war der erste, der die Bedingung dafür aufstellte, daß ein System ein geebnetes Bild erzeugt. Nach Seidel kommt bei Vorhandensein nur einer Glassorte die Bedingung der Bildebenung auf die Forderung hinaus, daß der Apparat, alle seine Flächen aneinander geschoben gedacht, unendlich große Brennweite haben d. h. wie eine planparallele Platte wirken müsse. Wenig günstiger gestaltet sich die Sache, wenn man zweierlei Glassorten, wie beim Achromaten, wählt, welcher gewöhnlich aus Flint- und Crownglas besteht. Denn es widerstreitet die Bedingung der Bildebenung dann der bei weitem wichtigeren Forderung, die infolge der Farbenzerstreuung auftretende Bildverschlechterung unschädlich zu machen.

Nur bei relativ dicken Gläsern kann man hoffen, dem Widerspruche zu begegnen.

Erst nachdem es Abbe im Verein mit Schott in Jena gelungen war, optische Gläser herzustellen, bei denen hohe Brechkraft mit geringer Dispersion gepaart ist, konnte der Petzval-Seidelschen Bedingung der Bildebenung genügt werden, ohne auf die Aufhebung der chromatischen Aberration zu verzichten. Kombiniert man ein zweilinsiges, achromatisches Objektiv, dessen Sammellinse einen größeren Brechungsindex hat als die Zerstreuungslinse (von mir „Neuachromat" genannt) mit einem zweilinsigen, achromatischen Objektiv, dessen Sammellinse einen kleineren Index hat als die Zerstreuungslinse („Altrachromat"), so erhält man bei geeigneter Wahl und Anordnung der Gläser tatsächlich ein System, welches bei beträchtlicher Oeffnung sowohl deutliche, als auch ebene Bilder von ausgedehnten Objekten erzeugt. Im Zeiss-Anastigmat tritt uns die „anastigmatische Bildebenung", wie wir mit P. Rudolph die gleichzeitige Beseitigung des Astigmatismus und der Bildwölbung bei Aufhebung sphärischer und chromatischer Fehler bezeichnen wollen, zum ersten Male verwirklicht entgegen, nachdem schon vorher Steinheil mit seinem Antiplanet den richtigen Weg zur Lösung dieses Zieles eingeschlagen hatte.

3g) Verzerrung. Orthoskopie. Airysche Tangentenbedingung. Die Verzerrung des geebneten scharfen Bildes ist mehr ein Schönheitsfehler. Nur da spielt er eine Rolle, wo man aus den Abständen von Bildpunkten auf die Abstände der Objektpunkte voneinander schließen will. Interessant ist es, daß sich für die Aufhebung dieses Fehlers eine einfache, für jede beliebige Ausdehnung des Objekts gültige und von der besonderen Wahl des Systems unabhängige Bedingung aufstellen läßt.

Um die Bedingung der „Orthoskopie", d. h. der winkelgetreuen und geometrisch ähnlichen Abbildung zu formulieren, nehmen wir an, daß alle vom Objekt L l (Fig. 7) kommenden engen Strahlenkegel die Achse des Systems S an ein und derselben Stelle p schneiden und daß ebenso die das Bild erzeugenden Büschel die Achse an ein und demselben Punkte p′ durchsetzen (in Figur 7 ist das Bild virtuell). Man erreicht den geforderten Strahlengang dadurch, daß man bei p und p′ Blenden einschiebt.

Ist x ein beliebiger Punkt des Objekts, x′ sein Bildpunkt, sind u und u′ die zugehörigen Achsenwinkel der von ihnen ausgegangenen Strahlen (wenn man die Zentral- oder Hauptstrahlen mit den engen Strahlenbüscheln identifiziert), sind n und n′ die Brechungsquotienten des Objekt- und Bildmediums und bedeutet β_0 die Lateralvergrößerung in bezug auf die konjugierten Ebenen p und p′ (bezogen auf Nullstrahlen), so erhalten wir als Bedingung der Orthoskopie

$$\frac{\operatorname{tg} u'}{\operatorname{tg} u} = \frac{n'}{n} \cdot \frac{1}{\beta_0} = \text{const} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (3)$$

Diese schon von Airy und unabhängig später von Abbe aufgestellte Tangentenbedingung sagt also aus, daß das Tangentenverhältnis tgu′/tgu oder die Angularvergrößerung für alle konjugierten Punktepaare x und x′ konstant sein muß. Nur wenn diese Tangentenbedingung erfüllt ist, bildet das System ein Kreuzgitter von sich rechtwinklig schneidenden Geraden (Schachbrett) wieder als ein Kreuzgitter (Schachbrett) ab; im anderen Falle tritt ein verzerrtes Bild auf.

Man nennt ein System, bei welchem der Tangentenbedingung genügt wird, ein „orthoskopisches" System und die Schnittpunkte der abbildenden Strahlenbüschel mit der Achse p oder p′ die „orthoskopischen" Punkte des Systems. Die orthoskopischen

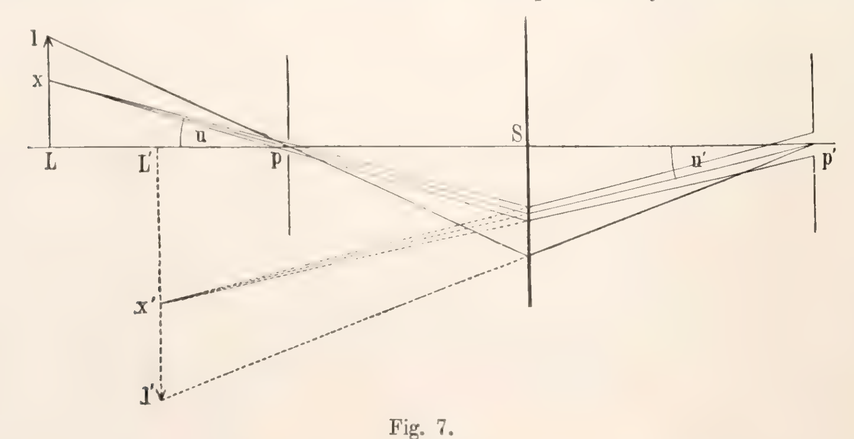


Fig. 7.

Punkte können nicht zu gleicher Zeit aplanatische Punkte sein (Sinusbedingung). Es kann also das ausgedehnte Objekt Ll nicht zugleich durch weit geöffnete Büschel abgebildet werden.

Die Tangentenbedingung ist, wie ich zeigte, nicht hinreichend, wenn nicht, wie in Figur 7 angenommen war, die von p kommenden und nach p′ zielenden abbildenden Strahlenbündel sich in einer durch S senkrecht zur Achse pp′ gelegten Ebene schneiden. Dies ist angenähert der Fall bei einer sehr dünnen einfachen Linse. In diesem Falle ist die Tangentenbedingung gleichbedeutend mit der Bedingung: es sollen alle von p kommenden Strahlen durch das System S wieder in einem Punkte p′ vereinigt werden, d. h. es soll das System S sphärisch korrigiert sein in bezug auf den Ort der Blende p und den dazu konjugierten Ort p′. Diese Bedingung ist bei einer Linse schlechterdings nicht zu erfüllen, da eine Zerstreuungslinse sphärisch überkorrigiert, eine Sammellinse sphärisch unterkorrigiert ist. Beide Linsensorten müssen also in entgegengesetztem Sinne verzerren.

Sind p und p′ die Ein- und Austrittspupille (4 b) des Systems S, so ist die Bedingung zur Herstellung der Orthoskopie ganz allgemein ausgedrückt folgende: Das System S soll sphärisch korrigiert sein in bezug auf den Ort der Eintrittspupille p und der Austrittspupille p′. Sie enthält die Tangentenbedingung in sich, während letztere allein noch nicht hinreichend ist, um die Verzerrung zu beseitigen.

Ein Kriterium zur Prüfung des Aplanatismus fand Abbe in der eigentümlichen Verzerrung, welche das Objekt Ll (Fig. 7) erfährt, wenn das Punktepaar p und p′ nicht ein orthoskopisches, sondern ein aplanatisches Punktepaar ist. In diesem Falle wird nämlich eine ganz bestimmte Doppelschar von Hyperbeln (Fig. 8) als ein Kreuzgitter d. h. als ein System sich senkrecht schneidender und aequidistanter Geraden abgebildet. Durch dieses Kriterium konnte Abbe nachweisen, daß bei den älteren Mikroskopobjektiven, welche Flächenelemente punktweise und ähnlich abbildeten, tatsächlich die Sinusbedingung erfüllt war, ohne daß die Konstrukteure eine Ahnung von der Sinusbedingung hatten.

3 h) Seidelsche Abbildung. Coma oder Fraunhofersche Bedingung. Projektionssysteme. Durch die Zerlegung der optischen Systeme in Spezialsysteme, von denen das eine Flächenelemente mittels beliebig weiter Büschel, das andere große Flächen mittels Elementarbüschel abbildet, konnten wir relativ leicht allgemeine Bedingungen dafür aufstellen, daß in jenen speziellen Fällen die Abbildung punktweise deutlich und richtig ist.

Wir wollen jetzt eine dritte Art optischer Systeme betrachten, welche eine Mittelstellung zwischen jenen extremen Fällen einnehmen; dahin gehören die Projektionssysteme oder die photographischen Objekte, welche im allgemeinen möglichst ausgedehnte Objekte mittels möglichst weiter Büschel punktweise abbilden sollen. Es sei hier erwähnt, daß bei diesem Systemtypus die Strahlenvereinigung keine allzu strenge, mathematisch genaue zu sein braucht, da man das entworfene Bild meist nur geringen Vergrößerungen unterzieht. „Punktweise" Abbildung ist eben ein relativer Begriff, der bei jedem System einer besonderen Definition bedarf

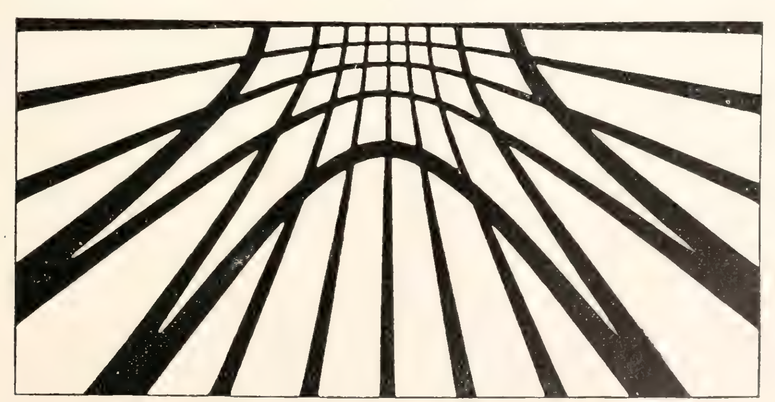


Fig. 8.

Um jenes Ziel zu erreichen, ist man fast ganz auf den Weg der Empirie angewiesen,

[1]) Wie M. v. Rohr gezeigt hat war diese von mir 1897 aufgestellte Zusatzbedingung schon früher (1862) von Airy und Sutton erkannt worden, ohne Beachtung gefunden zu haben.

sei es durch experimentelle Prüfung der Leistung wirklich ausgeführter Systeme, sei es durch trigonometrische Durchrechnung des Strahlenverlaufs auf dem Papiere. Nur noch einen Schritt weiter hat auf diesem Wege die mathematische Theorie geführt, welche von Seidel entwickelt worden ist, noch ehe Gauss seine epochemachende Abbildungslehre aufgestellt hatte. Die Gausssche Abbildung wird als Abbildung „dritter Ordnung" bezeichnet, weil die abbildenden Strahlen so kleine Winkel u mit der Achse des Systems bilden, daß $\sin u = u$ und $\cos u = 1$ gesetzt werden darf. Die Seidelsche Theorie stellt sich als Fortsetzung der Gaussschen dar, insofern sie bei der Abbildung alle Strahlen berücksichtigt, welche so große Winkel u mit der Achse bilden, daß in der Reihenentwickelung von sin u und cos u auch noch die Glieder dritten Grades zu berücksichtigen sind, während die fünften und höheren Potenzen als das Resultat nicht wesentlich beeinflussend zu vernachlässigen sind. Unter diesen Annahmen hat Seidel seine Theorie so weit ausgebildet, daß man aus der gefundenen Beziehung konjugierter Strahlen vor und nach der Brechung an einem Linsensystem den Einfluß der Oeffnung sowohl wie des Gesichtsfeldes auf die Vollkommenheit des Bildes erkennt.

Wir wollen eine Abbildung, welche die Glieder dritten Grades berücksichtigt, als Abbildung fünfter Ordnung bezeichnen, eine Abbildung, welche die Glieder fünften Grades berücksichtigt, als Abbildung siebenter Ordnung usw. Kommt bei der Gaussschen Abbildung dritter Ordnung ein punktweises Abbild zustande, so treten bei einer Abbildung höherer Ordnung Abweichungen oder „Fehler" von der punktweisen Strahlenvereinigung auf, deren Aufhebung an die Erfüllung gewisser Bedingungsgleichungen geknüpft ist. Ein punktweises Abbild fünfter Ordnung erfordert die Lösung von 5 Fehlergleichungen, ein solches siebenter Ordnung die Lösung von 17 Fehlergleichungen usw. Wir wollen hier nur die Resultate Seidels in bezug auf die Abbildung fünfter Ordnung (Seidelsche Abbildung) wiedergeben, bei welcher fünf Abbildungsfehler auftreten und deren Beseitigung die Erfüllung von 5 Fehlergleichungen erfordert.

Seien diese S_1 S_2 S_3 S_4 und S_5, so wird das Abbild einer Ebene senkrecht zur Achse nur dann ein präzises, d. h. ein scharfes, ebenes und ähnliches, wenn alle Ausdrücke S_1 bis S_5 verschwinden. Freilich können dann noch Fehler vorhanden sein, die durch die Glieder fünften und höheren Grades erzeugt werden, welche keine Berücksichtigung gefunden haben und bei den neueren photographischen Objektiven sicher zur Abbildung beitragen.

$S_1 = 0$ bedeutet daß die sphärische Aberration in der Achse aufgehoben ist. Ist gleichzeitig $S_1 = 0$ und $S_2 = 0$, dann ist reiner Astigmatismus vorhanden, d. h. alle von einem Objektpunkt ausgegangenen Strahlen schneiden eine gewisse Bildebene im letzten Medium in einer unendlich kleinen Geraden von gewisser Richtung, eine zweite Bildebene in einer zur ersten Geraden senkrechten unendlich kleinen Geraden. Damit diese Bildebenen zusammenfallen und die beiden Brennlinien zu einem Punkte zusammenschrumpfen, muß noch $S_3 = 0$ sein.

Jetzt erst entsteht von einem leuchtenden Punkte wieder ein Punkt. Die verschiedenen Bildpunkte liegen dabei aber nicht auf einer Ebene, sondern auf einer Rotationsfläche. Diese geht über in eine Ebene für den Fall, daß noch $S_4 = 0$ wird. Zur Beseitigung der Verzerrung der Außenteile des Bildes muß noch $S_5 = 0$ gemacht werden.

Die fünf Abbildungsfehler bei Berücksichtigung der Glieder dritter Ordnung sind also: Sphärische Aberration, Sinusbedingung, Astigmatismus, Bildwölbung und Verzerrung.

Auf eine Vermutung Seidels in bezug auf die Korrektion des berühmten Heliometerobjektivs von Fraunhofer wollen wir noch etwas näher eingehen. Berechnet man (Finsterwalder) aus den für das Objektiv angegebenen Konstanten (Radien der Flächen usw.) die Summen S_1 bis S_5, so findet man, daß $S_1 = 0$ und ebenso $S_2 = 0$ ist. Die Bedingung $S_2 = 0$, welche identisch ist mit der Sinusbedingung für kleine Oeffnung des Systems, bezeichnete Seidel daher als Fraunhofersche Bedingung. Diese Bedingung ist gleichbedeutend damit, daß das Coma beseitigt ist.

Ist das Coma nicht beseitigt, so entsteht bei der Vereinigung schiefer Büschel eine zum Hauptstrahl des Büschels einseitige Lichtverteilung; in erster Annäherung ist das Coma identisch mit einer unendlich kleinen Geraden.

Die fehlerfreie Abbildung fünfter Ordnung einer einzigen kleinen Objektebene kann man nur bei Anwendung genügend getrennter Flächen erreichen. Setzt man die Abstände der verschiedenen brechenden Flächen voneinander gleich Null, so führt bei gleichem Brechungsindex des ersten und letzten Mediums die Erfüllung aller fünf Bedingungen S_1 bis S_5 auf unendlich große Brennweiten; also, da das Fernrohr wegen der geforderten Distanzlosigkeit der einzelnen Systemteile ausgeschlossen ist, auf einen Spiegel oder eine dickenlose Planparallelplatte. Der Abstand der einzelnen brechenden

Flächen voneinander (Linsendicke) oder der verschiedenen Systemteile (Trennung in zwei Glieder) ist also ein wesentlicher Faktor zur Erzielung einer Abbildung höherer Ordnung.

Die Seidelsche Theorie ist insbesondere von Finsterwalder fortgebildet worden.

3 i) **Allgemeine Abbildungsgesetze kollinear verwandter Räume** (Theorie von Möbius und Abbe). Descartes studierte die Frage der punktweisen Strahlenvereinigung in der Weise allgemein, daß er diejeingen spiegelnden und brechenden Flächen zu bestimmen suchte, welche alle von einem Punkte ausgegangenen Strahlen in wieder einem Punkte vereinigen („Cartesische Ovalen"). Eine Verallgemeinerung der Abbildungsgesetze bei der Brechung an einer Kugelfläche bezw. unendlich dünnen Linsen führte erst Gauss durch, welcher zeigte, daß bei Beschränkung auf Nullstrahlen jene Abbildungsgesetze auch für beliebige zentrierte Systeme gelten. Aehnliche Gesetze finden statt auch bei der Abbildung durch ebene schiefe Strahlenbüschel an zentrierten Systemen und durch Nullstrahlen an nicht zentrierten Systemen. Es drängte sich somit der Gedanke auf, daß diese Beziehungen die Folge eines allgemeineren Prinzips sein und immer da auftreten müssen, wo eine Abbildung durch geradlinige Strahlen d. h. wo eine „kollineare" Beziehung zwischen dem Objektraum und dem Bildraum stattfindet.

Wir wollen mit Abbe die kollineare Verwandtschaft zweier Räume durch folgende Beziehungen definieren: 1. Die Abbildung ist eindeutig, da sich die Strahlen paarweise nur in je einem Punkte schneiden. 2. Den Punkten auf einer Geraden im einen Raume entsprechen als Bilder Punkte im anderen Raume, die wieder auf einer Geraden liegen. 3. Einer Ebene im Objektraume entspricht im Bildraume wiederum eine Ebene.

Möbius scheint zuerst erkannt zu haben, daß die Gausssche Abbildung die Beziehungen der kollinearen Verwandtschaft zweier Räume wiederspiegelt. Aber auch er und seine Nachfolger (Hankel) halten noch fest an der Voraussetzung, daß zur Verwirklichung der kollinearen Beziehung eine gewisse Art der dioptrischen Wirkung nötig sei. Erst Abbe hat bei der Ableitung der optischen Abbildung alle Voraussetzungen über deren Verwirklichung fallen lassen und gefunden, daß die Gaussschen Sätze und Begriffe (Brennweite usw.) vollkommen unabhängig von den physikalischen und geometrischen Bedingungen ihres Entstehens sind und nur der Ausdruck dafür, daß eine kollineare Abbildung zweier Räume in einander stattfindet.

Schon vor Abbe hatte Maxwell dem gleichen Gedanken Ausdruck gegeben; seine Arbeiten scheinen aber unbeachtet geblieben zu sein. Abbe geht bei seinem analytischen Entwickelungen der Kollineationsbeziehungen vom Merkmal 3 aus, da aus diesem rückwärts die Abbildung von Geraden in Gerade (als Schnittpunkte je zweier Ebenen) und von Punkten in Punkte (als Schnittpunkte je zweier Geraden) folgt.

Um den Zusammenhang zweier Räume R und R' näher zu studieren, werde in jedem derselben ein rechtwinkliges Coordinatensystem angenommen. Sind die Coordinaten eines Punktes P im einen Raum (Objektraum) x y z und die Coordinaten des konjugierten Bildpunktes P' im Bildraume x' y' z', so kann die mathematische Beziehung zwischen P und P' so formuliert werden

$$x' = \varphi(x\,y\,z)$$
$$y' = \chi(x\,y\,z)$$
$$z' = \psi(x\,y\,z)$$

Sind die Funktionen $\varphi\ \chi\ \psi$ ermittelt, so ist die analytische Beziehung beider Räume bekannt. Setzt man die Gleichungen einer Ebene E im Objektraum oder einer Ebene im Bildraume an und ersetzt die Coordinaten x' y' z' der letzteren durch die obigen Ausdrücke, so erhält man die Gleichung einer mit E identischen Ebene usw., woraus man schließlich die gesuchten Funktionen φ, χ und ψ erhält, durch welche die Abbildung vollständig bestimmt ist.

Aus den Beziehungen zwischen den Oertern konjugierter Ebenen folgt, daß endlichen Werten von x' y' z' im allgemeinen auch endliche Werte von x y z entsprechen und daß es ein System von Werten x y z gibt, denen unendlich große Werte von x' y' z' zugeordnet sind. Es sind also Unstetigkeitsebenen oder Brennebenen vorhanden. Ferner springt sofort das teleskopische System als singulärer Fall heraus. Auch ergeben sich ohne weiteres die für ein zentriertes System abgeleiteten Abbeschen Abbildungsgleichungen (vgl. den Artikel „Linsensysteme").

Abbe erhält so die Eigenschaften einer kollinearen Abbildung als Idealzustand, dem sich die praktische Optik zu nähern strebt. Diese ideale Abbildung ist bei Verwendung zentrierter Systeme nur bei Beschränkung auf Nullstrahlen verwirklicht (Gausssche Abbildung). Damit sie bei der Seidelschen Abbildung eintritt, müssen die fünf Seidelschen Abbildungsfehler beseitigt sein.

3k) Allgemeine Abbildungslehre bei Systemen mit Orthogonalflächen. Charakteristische Funktion. Eikonal. Gehen Strahlen von einem Lichtpunkt aus, so stehen sie im Objektmedium senkrecht auf Kugelflächen und nach beliebig vielen Spiegelungen oder Brechungen an stetig gekrümmten Flächen stets senkrecht auf Flächen kontinuierlicher Krümmung, den „Wellenflächen". Vorausgesetzt ist hierbei, daß die verschiedenen brechenden Medien homogen seien. Ganz allgemein gilt aber, daß, wenn Gerade im ersten Medium zu einer Fläche senkrecht stehen, sie nach jeder Richtung auf einer Fläche senkrecht stehen (Satz von Malus). Das System dieser Orthogonalflächen ist dadurch charakterisiert, daß zwischen 2 Orthogonalflächen die optische Länge längs jedes Strahles die gleiche ist, während nach dem Fermatschen Prinzip der Weg jedes Strahles durch die Bedingung

$$\delta \Sigma n \varrho = 0$$

bestimmt wird, worin $\Sigma n \varrho$ die Summe der optischen Weglängen zwischen den betrachteten Orthogonalflächen bedeutet. Setzen wir die Geschwindigkeit des Lichtes im Vakuum gleich 1, so ist die optische Länge $n\varrho$ nichts anderes als die Zeit, welche das Licht braucht, um die Strecke ϱ im Medium n zu durchlaufen (Lichtzeit). Die Lichtzeit ist also längs jedes Strahles zwischen 2 Orthogonalflächen konstant (vgl. den Artikel „Linsensysteme").

Auf Grund dieser Tatsachen läßt sich eine allgemeine Theorie der Abbildung insofern entwickeln, als man die Eigenschaften optischer Systeme untersuchen kann ohne deren spezielle Form zu kennen oder umgekehrt die Systeme findet, welche vorgeschriebenen Bedingungen genügen sollen. Im allgemeinen gelangt durch jedes optische System von einem beliebigen Punkt mit den Coordinaten x y z einer Orthogonalfläche nur ein Strahl zu einem Punkte mit den Coordinaten x'y'z' einer zweiten Orthogonalfläche, dessen Weg durch die Gleichung $\delta \Sigma n \varrho = 0$ bestimmt ist. Man kann also mit Hamilton die Weglänge zwischen den Punkten x y z und x'y'z' auffassen als eine Funktion der 6 Coordinaten beider Punkte; es sei diese F(x y z x'y'z'). Durch die Funktion F ist die Abhängigkeit der optischen Länge (Lichtzeit) von der Lage der beiden Punkte auf den zugehörigen Orthogonalflächen ausgedrückt, also ist das betreffende optische System durch die Funktion F charakterisiert. Man nennt diese Funktion F daher die charakteristische Funktion des optischen Systems.

Gehen die Strahlen im Objektmedium von einem Punkt (Objektpunkt) aus, so sind die Orthogonalflächen im Objektmedium konzentrische Kugeloberflächen mit dem Objektpunkt als Zentrum. Rechnet man die optischen Längen von der unendlich kleinen um den Lichtpunkt gelegten Kugelfläche (x y z) aus, so ist die Gleichung der Orthogonalflächen nach beliebig vielen Spiegelungen oder Brechungen also

$$F(xyzx'y'z') = \text{const}$$

worin wir xyz als feste und x'y'z' als laufende Coordinaten betrachten können. Ist der Objektpunkt ein leuchtender Punkt, so stellt unsere Gleichung im Sinne der Wellenlehre sämtliche Wellenflächen dar.

Unser Problem, mit Hilfe der charakteristischen Funktion den Verlauf der Strahlen und damit die Eigenschaften des Systems zu finden, hat viel Verwandtes mit den Problemen der Potentialtheorie (vgl. den Artikel „Potential"). Haben Kräfte ein Potential F, so sind die Flächen gleichen Potentials durch die Gleichung

$$F = \text{const}$$

dargestellt und auf ihnen stehen senkrecht die Kraftlinien. Diese sind vergleichbar unseren Strahlen, die Potentialflächen den Wellenflächen. Es ergibt sich somit ohne weiteres, daß der von xyz kommende und durch x'y'z' gehende Strahl daselbst die Richtungskosinusse $\alpha'\beta'\gamma'$ mit den Coordinatenachsen bildet, welche gegeben sind durch

$$\alpha':\beta':\gamma' = \frac{\partial F}{\partial x'}:\frac{\partial F}{\partial y'}:\frac{\partial F}{\partial z'}$$

Nach dem Prinzip der Reziprozität der Lichtwege muß der vom Punkte x'y'z' kommende Strahl im Objektraume durch xyz gehen. Diesem Strahl kommen also die Richtungskosinus $\alpha\beta\gamma$ zu:

$$\alpha:\beta:\gamma = \frac{\partial F}{\partial x}:\frac{\partial F}{\partial y}:\frac{\partial F}{\partial z}$$

Infolge der Bedeutung von F als optischer Weglänge muß also für den Fall, daß n und n' den zur Fläche xyz und x'y'z' zugehörigen Brechungsquotienten bedeutet, gelten

$$\alpha = -\frac{1}{n}\frac{\partial F}{\partial x} \qquad \alpha' = +\frac{1}{n'}\frac{\partial F}{\partial x'}$$

$$\beta = -\frac{1}{n}\frac{\partial F}{\partial y} \qquad \text{und} \qquad \beta' = +\frac{1}{n'}\frac{\partial F}{\partial y'}$$

$$\gamma = -\frac{1}{n}\frac{\partial F}{\partial z} \qquad \gamma' = +\frac{1}{n'}\frac{\partial F}{\partial z'}$$

durch welche Gleichungen zu jedem Objektstrahl durch den Punkt xyz (bestimmt durch seine Coordinaten xyz und Richtungskosinusse $\alpha\beta\gamma$) der konjugierte Bildstrahl durch den Punkt x'y'z' (bestimmt durch seine Coordinaten x'y'z' und seine Richtungs-

kosinusse $\alpha'\beta'\gamma'$) eindeutig zugeordnet ist. Bei bekannter Funktion F drücken unsere Gleichungen also aus, wie der Objektraum strahlenweise in den Bildraum abgebildet wird. In einer solchen strahlenweisen Abbildung besteht aber die Wirkung jedes beliebigen Systems. Für die charakteristische Funktion folgen aus den Gleichungen durch Addition, da $\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2 = 1$ und $\alpha'^2 + \beta'^2 + \gamma'^2 = 1$ ist, die Differentialgleichungen

$$\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial z}\right)^2 = n^2$$

$$\left(\frac{\partial F}{\partial x'}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y'}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial z'}\right)^2 = n'^2$$

Je nachdem man die Bestimmungsstücke wählt, erhält man eine andere charakteristische Funktion F(xyz x'y'z') des optischen Systems. Unabhängig von seinen Vorgängern hat M. Thiesen eine einfache charakteristische Funktion aufgestellt, um aus ihr die Existenzmöglichkeiten von Abbildungssystemen zu finden, die gewissen vorgeschriebenen Bedingungen genügen. 1895 hat Bruns eine charakteristische Funktion, das Eikonal, aufgestellt. Er bestimmt einen Strahl durch 2 Coordinaten seines Schnittpunktes mit einer festen Ebene und durch die zwei Richtungskosinusse gegen 2 der Coordinatenachsen. Ein Strahlenbüschel erhält man, wenn diese 4 Strahlencoordinaten von 2 Parametern abhängig gemacht werden. Die Abbildungsgleichungen ergeben sich aus den partiellen Ableitungen der Eikonalfunktion nach den Coordinaten konjugierter Punkte.

4. Strahlenbegrenzung. 4 a) Zweck der Blenden. Da ein optisches System weder unendlich große Objekte, noch auch einen Punkt mittels beliebig weiter Büschel abbildet, so bedient man sich geeigneter Blenden oder Diaphragmen, welche den Strahlengang in gewünschter Weise begrenzen. Die so willkürlich herbeigeführte Strahlenbegrenzung ist für die Theorie der optischen Instrumente, deren Helligkeit, Auflösungsvermögen usw von großer Wichtigkeit. Sie ist zum Teil von Helmholtz, hauptsächlich aber von Abbe entwickelt worden.

4 b) Eintritts- und Austrittspupille. Iris. Bei jeder Abbildung (Fig. 9) werden die abbildenden Strahlenbüschel im Objektraume von einer Blende p begrenzt, deren Bild p′ in bezug auf das optische System die Strahlenbüschel im Bildraume begrenzt, so daß kein Strahl aus dem System durch p′ austreten kann, der es nicht durch p eintretend erreicht hat. Die wirksame Blende im Objektraume heißt nach Abbe die Eintrittspupille, diejenige im Bildraume die Austrittspupille. Beide brauchen nicht wirklich als körperliche Blenden oder Diaphragmen vorhanden zu sein, sondern können die Bilder einer solchen sein.

Die körperliche Blende p übt einen Einfluß auf die Begrenzung und Basis der abbildenden Büschel aus. Um diesen Einfluß kennen zu lernen suchen wir zunächst das Bild p′ von p in bezug auf das System S auf. Kennen wir noch die Lage vom Objekt ALB und dessen Bild A′L′B′, so ist der Gang eines jeden Strahles ohne weiteres zu bestimmen. Es muß z. B. der Strahl Ac notwendig durch die konjugierten Bildpunkte von A und c, d. h. durch A′ und c′ gehen; ferner entsprechen sich Ad und A′d′.

Die nicht nach cd zielenden Strahlen kommen bei der Bilderzeugung nicht zur Geltung, und nur die im Kegel c′A′d′ verlaufenden Strahlen tragen zum Bildpunkte A′ bei.

Der allgemeinste Fall wird durch folgende Betrachtung gefunden. Es liege die körperliche Blende P (Fig. 10) zwischen den Systemen S_1 und S_2; ferner sei p_1 das Bild von P in bezug auf System S_1, und p_2 das Bild von P in bezug auf System S_2. Das Objekt ALB werde durch das Gesamtsystem $S_1 + S_2$ in A′L′B′ abgebildet.

Bei dieser Lage hat das aus S_1 austretende Büschel die Plende P zur Basis, demnach muß das eintretende nach p_1 zielen, um zur Geltung zu kommen. Das aus S_2 austretende Büschel ist vor dem Eintritt durch die Blende P gegangen; es muß also p_2 zur Basis haben. Die in bezug auf das Gesamt-

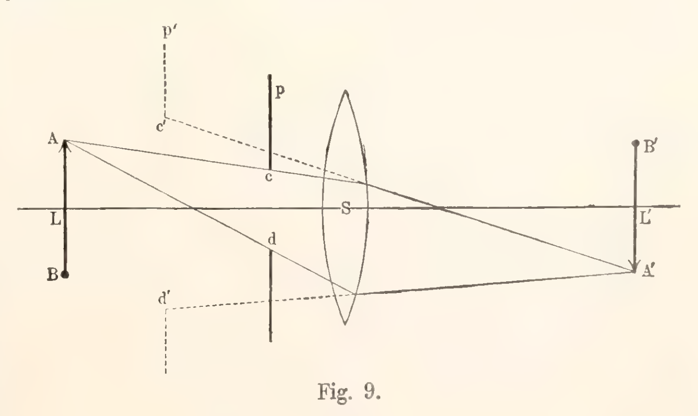


Fig. 9.

system $S_1 + S_2$ konjugierten Oeffnungen p_1 und p_2 sind demnach für den Strahlengang maßgebend als Begrenzungen. Sie ersetzen in ihrer Wirkung vollkommen die Blende P.

Fig. 10.

Sind mehrere Blenden P vorhanden, so ist jene für die eintretenden Strahlenbüschel die maßgebende, deren Bild p, im Objektraume vom Orte L des Objektes unter dem kleinsten Winkel erscheint.

Beim Auge ist der in Figur 10 dargestellte Fall vorhanden. Zwischen der Linse und der Augenkammer befindet sich die Iris mit der Pupillenöffnung. Von ihr entwerfen Hornhaut und Augenwasser ein Bild vor dem Auge; demnach sind nur diejenigen Strahlen wirksam, welche nach diesem Bilde zielen. Man sieht dieses Bild, wenn man dem Beobachter direkt in das Auge blickt. Wegen dieser Analogie hat Abbe die körperliche Blende P eines Systems die Iris, das Bild p_1 der Iris im Objektraume die Eintrittspupille und das Bild p_2 der Iris im Bildraume die Austrittspupille genannt.

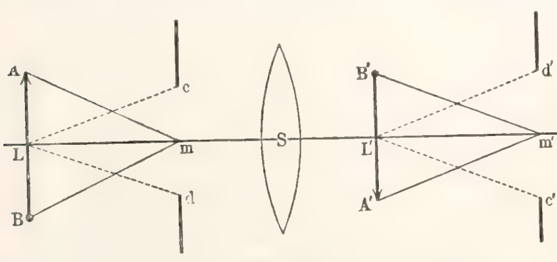


Fig. 11.

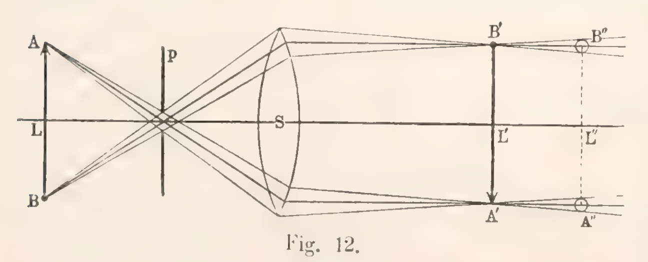


Fig. 12.

4c) H a u p t s t r a h l e n. Als Hauptstrahlen bezeichnen wir diejenigen, welche, vom Rande des Objektes ausgehend, sich in der optischen Achse da kreuzen, wo die Eintrittspupille cd (Fig. 11) liegt; es sind also die Strahlen Am und Bm. Indem man diese durch das ganze System weiter verfolgt, erhält man gleichsam das „Gerippe" des Strahlenganges. Den Hauptstrahlen Am und Bm im Objektraume entsprechen im Bildraume die vom Rande des Bildes A'B' nach demjenigen Achsenpunkte m' gezogenen Geraden A'm' und B'm', in welchem die Achse von der Austrittspupille c'd' geschnitten wird. Die Kreuzungspunkte m und m' der Hauptstrahlen mit der Achse bilden zugleich die Z e n t r e n d e r P e r s p e k t i v e.

Die Form der Pupillen p_1 und p_2 ist maßgebend für die Gruppierung der Strahlen eines Büschels rund um den Hauptstrahl. Bei kreisförmigen Pupillen liegt also der Schwerpunkt des Querschnittes eines Büschels stets auf dem Hauptstrahl.

4d) T e l e z e n t r i s c h e r S t r a h l e n g a n g. Ein solcher Strahlengang wird praktisch erzielt, wenn man, wie in Figur 12, in der vorderen Brennebene des Systems eine enge körperliche Blende p anbringt. Dann zielen die Hauptstrahlen im Bildraume nach dem unendlich fernen Bildpunkte der Blendenmitte, d. h. sie laufen parallel zur Achse. Ein solches System heißt „telezentrisch nach der Bildseite". Bei ihm bleibt der Abstand A''B'' der Schwerpunkte der Büschelquerschnitte von gleicher Größe, wo auch immer im Bildraume A''B'' liegen möge. Da man beim Messen auf diese Schwerpunkte einstellt, so erhält man auch bei beträchtlicher Parallaxe L'L'' zwischen dioptrischer Bildebene und physischer Einstellungsebene die wahre Bildgröße. Analog kann man durch Einsetzen einer relativ engen Blende in den hinteren Brennpunkt ein optisches System „telezentrisch nach der Objektseite" machen.

4e) R e z i p r o z i t ä t z w i s c h e n O b j e k t u n d E i n t r i t t s p u p i l l e oder B i l d u n d A u s t r i t t s p u p i l l e. Wie aus Figur 13 ersichtlich ist, gehen von der Eintrittspupille cd Strahlenkegel aus, welche das Objekt AB

zur Basis haben, während umgekehrt die von einem Objektpunkte kommenden Strahlen die Eintrittspupille cd zur Basis haben. Analog verhält es sich mit dem Bilde und der Austrittspupille. Die sämtlichen wirksamen Strahlen lassen sich demnach in zweierlei Art zusammenfassen: Einmal als Strahlenkegel, ausgehend von den Objektpunkten, mit der Eintrittspupille als Querschnitt, das andere Mal, ausgehend von den Punkten der Eintrittspupille, mit dem Objekt als Basis. Wir können nach Belieben die Rolle von Objekt und Eintrittspupille vertauschen. Ist AB das Objekt, so ist cd die Eintrittspupille; ist cd das Objekt, so ist AB die Basis der abbildenden Büschel.

Aus dieser Reziprozität folgt notwendig, daß es unmöglich ist, gleichzeitig AB und cd beliebig groß zu nehmen.

4f) *Oeffnungswinkel. Projektionswinkel. Gesichtsfeldwinkel. Bildwinkel.* Die Winkel, welche einerseits für die Lichtstärke oder die Weite der abbildenden Büschel, andererseits für die Größe des abgebildeten Objektes bestimmend sind, hat man mit besonderen Namen belegt. So nennt man den Winkel cLd (siehe Fig. 11), unter welchem die Eintrittspupille vom Achsenpunkte L des Objektes AB aus erscheint, den *Oeffnungswinkel* des Systems. Analog heißt der konjugierte Winkel c'L'd', unter welchem die Austrittspupille vom Bildorte L' aus erscheint, der *Projektionswinkel*.

Ist das Objekt so klein, daß von allen Punkten desselben Strahlen zum System und von da durch die Austrittspupille zum Bilde gelangen, so ist das Gesichtsfeld durch das Objekt selbst begrenzt. Man nennt dann den Winkel AmB (Fig. 11), unter dem das Objekt vom Orte m der Eintrittspupille aus erscheint, den *Objekt- oder Gesichtsfeldwinkel*. Analog heißt der konjugierte Winkel B'm'A', unter welchem das Bild A'B' vom Orte m' der Austrittspupille erscheint, der *Bildwinkel*.

Für gewöhnlich haben wir es aber mit beliebig ausgedehnten Objekten zu tun, und in diesem Falle wird das Objektstück, welches zur Abbildung gelangt, nicht mehr durch sich selbst begrenzt, sondern durch Blenden ausgeschnitten. Zur Erläuterung diene die Figur 14. In ihr seien S_1 und S_2 die beiden Teile des Gesamtsystems, zwischen denen die beiden körperlichen Blenden P und 𝔓 vorhanden sind. Wie beim Aufsuchen

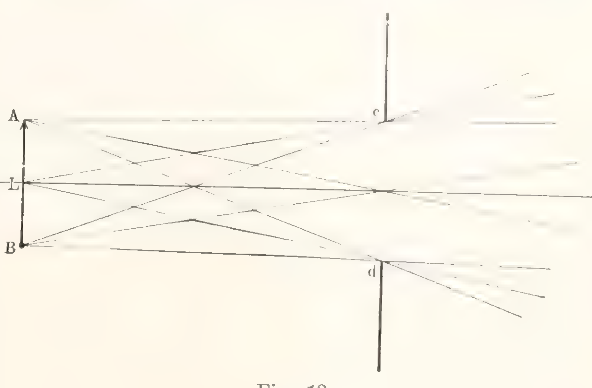


Fig. 13.

der Eintrittspupille konstruieren wir zuerst die Bilder aller vorhandenen Blenden (natürlich die Ränder der Linsen des Systems eingeschlossen), welche die vor ihnen liegenden Systemteile im Objektraume erzeugen. Der Rand der Linse S_1 ist sein eigenes Bild. Von P entwerfe die Linse S_1 das virtuelle Bild p und von 𝔓 das reelle Bild 𝔭; vom Linsenrande S_2 entstehe das reelle Bild s_2

Von allen diesen Blendenbildern erscheint vom Orte L des Objektes das Bild p unter

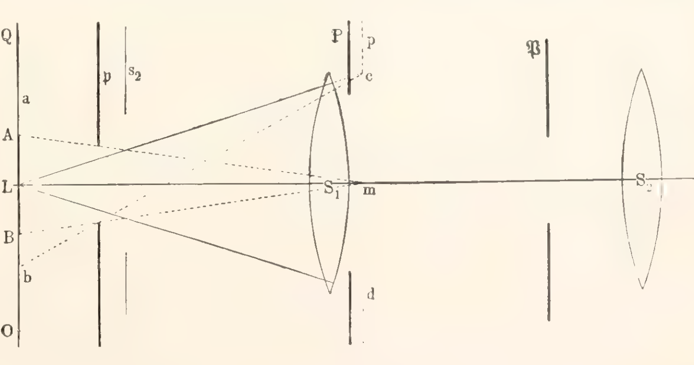


Fig. 14.

dem kleinsten Winkel; dieses ist also die Eintrittspupille. Es kommen demnach nur diejenigen Strahlen vom Objekt zur Wirksamkeit, welche durch S_1 nach p zielen und nicht durch die Blenden 𝔭 und s_2 abgeblendet werden. Diese beiden Blenden wirken also als Gesichtsfeldblenden.

Um die wirksame Gesichtsfeldblende zu finden, müssen wir daher diese Blenden vom Achsenpunkte m der wirksamen Eintrittspupille als Projektionszentrum auf die Ob-

jektebene Q projizieren. Die, deren Projektion von m aus unter dem kleinsten Winkel erscheint, ist die wirksame Gesichtsfeldblende. In Figur 14 ist also 𝔭 und 𝔓 die wirksame Gesichtsfeldblende und der Winkel AmB demnach der Gesichtsfeldwinkel. Es wird also nur das Stück AB vom Objekt OQ abgebildet.

Das vom ganzen System $S_1 + S_2$ entworfene Bild von AB (in Figur 14 nicht gezeichnet) begrenzt demgemäß das Sehfeld im Bildmedium, und analog ist der Winkel, unter dem das Bild von AB am Orte der Austrittspupille erscheint, der maßgebende Bildwinkel.

Ist 𝔭 nicht vorhanden, so füllt das von jedem Punkte A, B, oder L kommende Strahlenbüschel die Eintrittspupille cd voll aus. Beim Vorhandensein der Gesichtsfeldblende 𝔓 und 𝔭 kommen aber z. B. von A und B nur halb so viel Strahlen zur Wirksamkeit wie von L. Nur die von A nach md und die von B nach mc zielenden Strahlen gelangen in das System. Da von der Anzahl der Strahlen aber die Intensität im Bildpunkte abhängt, so erscheint das Bild verwaschen und nach dem Rande zu lichtschwächer.

Erst wenn 𝔭 mit der Objektebene Q koinzidiert, senden wieder alle Punkte des wirksamen Teiles von Q gleich viel Strahlen in das System, und das Objekt erscheint scharf begrenzt. Dieser Fall ist immer dann zu verwirklichen, wenn die Gesichtsfeldblende 𝔓 am Orte des dioptrischen Bildes liegt, welches das System S_1 vom Objekt entwirft. Beim astronomischen Fernrohr bringt man daher eine passende Blende in der Brennebene des Objektivs an. Beim Galileischen Fernrohr oder Opernglas, wo das reelle Objektivbild gar nicht zustande kommt, kann daselbst auch keine Blende angebracht werden. Die Folge ist ein unscharfes, nach dem Rande zu verwaschenes Bild.

4g) Numerische Apertur und Oeffnungswinkel. Außer vom Oeffnungswinkel hängt die zum Bildpunkte geführte Lichtmenge noch von anderen Faktoren ab. Sendet doch ein strahlendes Flächenelement wie z. B. ein glühendes Platinblech um so weniger Licht aus, je größer der Winkel ist, welchen die Strahlungsrichtung mit der Flächennormalen bildet. Für alle Körper und Flammen, für welche das Lambertsche Gesetz der Ausstrahlung gilt (O. Lummer und F. Reiche) ist die in beliebiger Richtung ausgestrahlte Energie gleich der senkrecht ausgestrahlten Energie multipliziert mit dem Kosinus des Ausstrahlungswinkels. Es strahle ein solches Flächenelement in einem Medium mit dem Brechungsquotienten n, während das Flächenelement von einem aplanatischen System abgebildet werde. Dann läßt sich zeigen, daß die ganze vom Objektelement zum Bildelement transportierte Strahlungsmenge proportional ist dem Produkt

$$n . \sin u$$

wobei u den halben Oeffnungswinkel der abbildenden Büschel im Objektraum bedeutet.

Damit im Bildpunkte bei beliebigem Oeffnungwinkel u und bei beliebigem Brechungsquotient n des Objektraumes die doppelte, dreifache usw Lichtmenge vereinigt werde, muß man das Produkt $n . \sin u$ verdoppeln, verdreifachen usw, nicht aber, wie man früher glaubte, den Oeffnungswinkel. Ganz allgemein ist also die zu einem Bildpunkte von einem beliebigen System geleitete Lichtmenge proportional dem Produkt aus dem Brechungsquotient des Mediums, in dem das Objekt strahlt, multipliziert mit dem Sinus des in diesem Medium gemessenen halben Oeffnungswinkels. Das Produkt $n . \sin u$ ist von Abbe als die numerische Apertur bezeichnet worden.

Zwei Systeme sind demnach in bezug auf die Strahlenkonzentration einander gleich, wenn sie gleiche numerische Aperturen haben. Wie auch n und u variieren, wenn nur $n . \sin u$ stets denselben Wert hat, so vereinigt das System die gleiche Strahlenmenge in dem zum Objektpunkte konjugierten Bildpunkte.

Strahlt z. B. das Objekt in Luft, so ist $n = 1$, und die Apertur des Systems erreicht für $u = 90^{\circ}$ ihren maximalen Wert $n . \sin u = 1$. Ist dagegen $n = 1{,}5$, so wird der Maximalwert bei $u = 90^{\circ}$ jetzt 1,5. Das System bringt also in jeder Achsenebene 1,5 mal so viel Strahlen zum Bildpunkte, wenn der Brechungsquotient des Objektraumes von 1 bis 1,5 anwächst. Demgemäß verhält sich die ganze Strahlenmenge, welche vom System im Kegelraume zum Bildpunkte geführt wird, in beiden Fällen wie $1^2 : 1{,}5^2$, d. h. wie $1 : 2{,}25$.

Die Apertur $n . \sin u$ ist also das wahre Maß für die Strahlenaufnahmefähigkeit eines Systems. Die Einheit dieses Maßes hat ein optisches System, das die von einem Objektpunkte in einem Medium vom Brechungsquotienten Eins in eine Halbkugel entsandten Strahlen im konjugierten Bildpunkte sammelt. Der Oeffnungswinkel dagegen ist ohne direkten Zusammenhang mit der Leistung des Systems. Ein Oeffnungswinkel von 120° im Medium $n = 1{,}5$ führt mehr Strahlen zum Bildpunkte, als ein Oeffnungswinkel von 180° in Luft, denn es ist $1{,}5 . \sin 60^{\circ} = 1{,}3$ und $1 . \sin 90^{\circ} = 1$.

4h) Okularkreis. Alle wirksamen Strahlen im Bildraume durchsetzen die

Austrittspupille oder scheinen von ihr zu kommen. In Figur 15 sei A′L′B′ das reelle Bild des Objekts und c′m′d′ die Austrittspupille des Systems. Dann ist B′m′A′ der Bildwinkel und d′L′c′ der Projektionswinkel, von dessen Größe die Lichtstärke abhängt.

Tritt zu der Austrittspupille c′d′ noch eine zweite Blende π mit der Oeffnung r s, so beeinflußt diese den Strahlengang in zweierlei Hinsicht. Fällt r s nicht zusammen mit dem Kreuzungspunkte m′ der Hauptstrahlen im Bildraume, so wird der Bildwinkel verkleinert, und somit auch das Gesichtsfeld des Instrumentes. Fällt r s mit c′d′ zusammen, so blendet diese zwar vom Gesichtsfelde nichts ab, wohl aber je nach ihrer Größe von dem Querschnitte der Strahlenbüschel und damit von der Strahlenmenge.

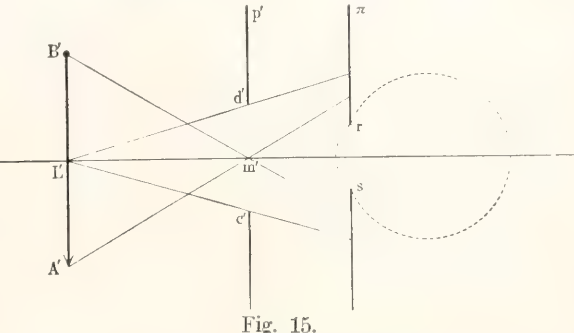


Fig. 15.

Bei subjektiver Beobachtung des optischen Bildes ist rs identisch mit der Pupille des Auges. Um daher die Leistungsfähigkeit des Systems in bezug auf das Gesichtsfeld auszunutzen, muß man vor allem die Augenpupille mit der Austrittspupille zur Koinzidenz bringen. Man nennt daher den Achsenpunkt m′ der Austrittspupille auch den Augenpunkt und die kreisförmige Austrittspupille selbst den Augenkreis oder Okularkreis.

5. Lichtwirkung optischer Systeme. 5a) Mittelbare Lichtstrahlung. Wir wissen, daß die von den Lichtquellen beleuchteten Körper dem Auge wahrnehmbar sind und ihrerseits andere Körper erhellen können. Es muß ihnen also eine abgeleitete oder „erborgte" Leuchtkraft zukommen. Wir unterscheiden zwei Fälle: Die Oberfläche eines Körpers wirkt diffus reflektierend oder regelmäßig spiegelnd und brechend.

Im ersten Falle, den Körper mit vollkommen rauher Oberfläche darbieten, wird alles einfallende Licht diffus zerstreut, d. h. so nach allen Seiten gleichmäßig zurückgesandt, als ob die einzelnen Oberflächenpunkte selbstleuchtend wären. Es kommt also nur darauf an, das Verhältnis zu bestimmen, in welchem die von je einem Flächenelemente zurückgestrahlte Lichtmenge zu der gesamten auf dasselbe auffallenden steht. Diese Zahl ist stets ein echter Bruch, dessen Wert für die verschiedenen Körper zwischen Null und Eins schwankt, aber auch für einen bestimmten Körper noch verschieden ist, je nach der Farbe des Lichtes. Das Verhältnis sei E. Ist für alle Farben $E = 0$, so heißt der Körper absolut schwarz; ist $E = 1$, so wird man ihn absolut weiß nennen müssen. Absolut schwarze Körper gibt es, zumal wenn sie auf höhere Temperaturen gebracht werden, in der Natur nicht, sie lassen sich aber künstlich verwirklichen (Lummer und Wien).

Der zweite Fall betrifft diejenigen Körper, welche an ihrer Oberfläche die Strahlen regelmäßig teils reflektieren, teils brechen. Es sei A (Fig. 16) eine leuchtende Fläche, von deren sämtlichen Punkten Strahlen in jedem Punkte m der Fläche S von obiger Eigenschaft zusammentreffen. Dann gehen von jedem Punkte m zwei Strahlenbüschel aus, das eine (reflektierte) nach dem äußeren Raume, das andere (gebrochene) nach dem Inneren der Substanz; beide je innerhalb eines kegelförmigen Raumes verlaufend, dessen Lage und Begrenzung von der Größe, Entfernung und Gestalt der

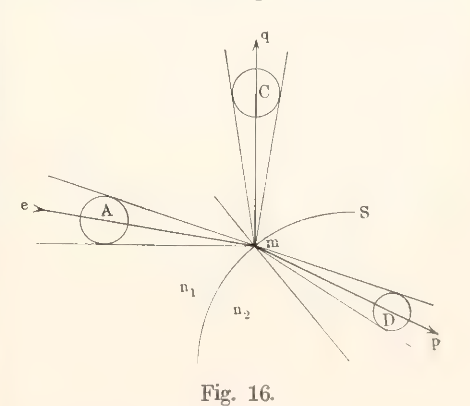


Fig. 16.

Lichtquelle und der Richtung der Tangentialebene bei m an die Fläche S abhängt. Da solches für alle Punkte m gilt, nur daß Lage und Begrenzung der Büschel von Punkt zu Punkt variiert, so verhält sich jedes Element m der Fläche S wie das einer selbstleuchtenden Lichtquelle, und zwar in unserem Beispiel nach der äußeren und inneren Seite hin, mit dem Unterschiede jedoch, daß es solche Wirkung nicht nach allen Richtungen ausübt, wie ein wirklich selbstleuchtender oder diffus reflektierender Körper, sondern

nur in den kegelförmigen Räumen, in welchen die reflektierten und gebrochenen Strahlen verlaufen. Wir brauchen demnach nur noch zu wissen, welche Intensität oder Leuchtkraft Punkt für Punkt der Fläche beizulegen ist.

Dazu müssen wir die Intensitäten i_1 und i_2 der beiden Strahlen q und p bestimmen, in welche ein einfallender Strahl von gegebener Intensität i (am Ort der Lichtquelle) sich spaltet.

Nach dem Kirchhoff-Clausiusschen Strahlungsgesetz ist die Emission einer Strahlungsquelle proportional dem Quadrate des Brechungsquotienten des Mediums, in dem sie strahlt. Ist also i_1 die Intensität eines leuchtenden Flächenelementes im Medium n_1, und i_2 dieselbe im Medium n_2, so gilt

$$i_1 n_2^2 = i_2 n_1^2$$

Wir wollen nur die beiden Grenzfälle betrachten, wo entweder alles Licht gespiegelt wird (vollkommene Spiegelung) oder alles Licht gebrochen wird (vollkommene Brechung.

In dem Falle vollkommener Spiegelung kann man die von der Fläche S durch Spiegelung nach einem Punkte (C) vermittelte Strahlungswirkung als von ihr selbst ausgehend denken, wenn man jedem Punkte m derselben diejenige Intensität oder Leuchtkraft unverändert überträgt, welche die Lichtquelle in dem zum bestrahlten Punkte C konjugierten, gemäß der Reflexion zugeordneten Punkte A besitzt.

Bei vollkommener Brechung wird

$$i_2 = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 i_1 \quad \ldots\ldots\ldots (4)$$

d. h. man kann die brechende Fläche S anstatt der Strahlungsquelle als leuchtend betrachten, wenn man ihr Punkt für Punkt m die im Verhältnis des Quadrates der absoluten Brechungsquotienten beider Medien veränderte Leuchtkraft beilegt, welche die Lichtquelle in dem zu m konjugierten Punkte besitzt.

In beiden Fällen ist die für C und D sich ergebende Verteilung der Leuchtkraft in der Fläche S als eine zentrale Projektion der Lichtquelle A auf die Fläche S anzusehen, welche vom Punkte C und D aus nach dem Reflexions- und Brechungsgesetz zu bilden ist.

Es läßt sich diese Regel auf beliebig viele spiegelnde und brechende Flächen übertragen Stets läßt sich die Strahlungswirkung der Lichtquelle auf einen Punkt im letzten Medium n_2 ersetzen durch die direkte Strahlung einer daselbst willkürlich angenommenen, beliebig gestalteten Fläche, wenn man dieser Punkt für Punkt eine Leuchtkraft beilegt, welche sich aus der Leuchtkraft in je einem konjugierten Punkte der Lichtquelle ableitet, und zwar gemäß der Regel $i_2 = (n_2/n_1)^2 . i_1$. Der konjugierte Punkt der Lichtquelle zu irgend einem Punkte der Ersatzfläche ist stets derjenige, auf welchen man geführt wird, wenn man die Verbindungslinie zwischen dem Orte der Wirkung und dem Punkte der Ersatzfläche nach den Gesetzen der Spiegelung und Brechung durch das System bis zur Lichtquelle fortsetzt.

5b) Optisches Bild als äquivalente Leuchtfläche. Unter der Annahme, daß ein optisches System zentrierter Kugelflächen S (Fig. 17) das Objekt AB im Bilde A'B' aberrationsfrei abbildet, sind die von den Bildpunkten ausgehenden Strahlenbüschel homozentrisch, gleichsam als ob das Bild selbstleuchtend wäre. Gleichviel, ob das Bild reell oder virtuell ist, stets kann es als die Quelle aller Lichtwirkungen im Bildmedium aufgefaßt werden, da alle hier verlaufenden Strahlen lediglich von Bildpunkten geradlinig auszugehen scheinen. Jedoch ist wieder ein Unterschied vorhanden, der die Bildstrahlung von der eines Selbstleuchters unterscheidet. Die Bildpunkte strahlen nicht wie leuchtende Punkte nach allen Seiten, sondern nur innerhalb gewisser Winkelräume.

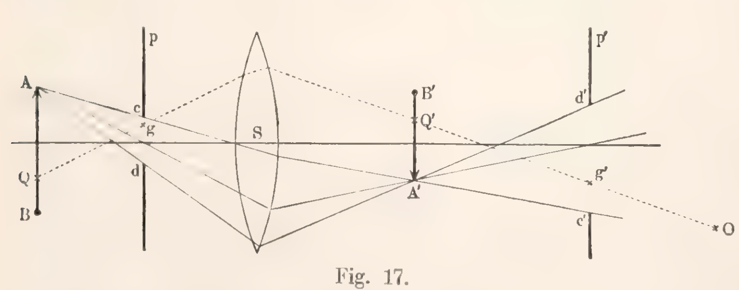


Fig. 17.

Diese Winkelräume sind festgestellt, sobald wir die Strahlenbegrenzung im System kennen. Es möge für das System S (Fig. 17) p die Eintrittspupille mit der Oeffnung cd und p' die Austrittspupille mit der Oeffnung c'd' sein. Dann verhalten sich p und p' wie Objekt und Bild, und alle nach cd zielenden Strahlen müssen im Bildraume c'd' passieren. Es begrenzt also die Austrittspupille die von jedem Bildpunkte kommenden Strahlenbüschel. Der Unterschied zwischen dem Bilde A'B' und einem Selbst-

leuchter A'B' von derselben Intensität ist lediglich der, daß das Bild durch eine Blende c'd', der Selbstleuchter dagegen unbehindert nach allen Seiten strahlt.

Um zu wissen, mit welcher Leuchtkraft der betrefende Bildpunkt Q' leuchtet oder zu belegen ist, damit wir vom Objekt ganz abstrahieren können, brauchen wir nur die Gerade OQ' gemäß den dioptrischen Gesetzen durch das System S hindurch zu verfolgen, bis sie das Objekt im konjugierten Punkte Q trifft. Sind n_1 und n_2 die absoluten Brechungsquotienten des Objekt- und Bildraumes, so muß bei vollkommener Brechung jedem Bildpunkte Q' die $(n_2/n_1)^2$ mal so große Leuchtkraft oder Intensität des konjugierten Objektpunktes zugeschrieben werden. Ist $n_2 = n_1$, so strahlt jeder Bildpunkt mit derselben Intensität wie sein konjugierter Objektpunkt. Leuchtet das Objekt in allen seinen Teilen mit gleicher Intensität, so tut es auch das Bild. Es gilt demnach ganz allgemein für jedes optische System zentrierter Kugelflächen:

Die gesamte Strahlenwirkung, welche ein beliebiger optischer Apparat vom Objekt- zum Bildraume vermittelt, ist vollständig bestimmt, wenn man dem Bilde des Objektes punktweise die Leuchtkraft der konjugierten Punkte des Objektes selbst (oder eine $(n_2/n_1)^2$ mal so große) beilegt, und die vom Bilde ausgehende Strahlenausbreitung durch die Austrittspupille begrenzt denkt.

Statt des Bildes A'B' kann man auch die Austrittspupille c'd' als äquivalente Leuchtfläche einführen. Dieser Fall ist wichtig bei der Ermittelung objektiv projizierter Bilder z. B. beim „Brennglas". Es gilt in diesem Falle der Satz:

Die Lichtwirkung, welche irgend ein optischer Apparat in einem beliebigen Punkte des Bildes eines gegebenen Objektes (Lichtquelle) vermittelt, ist stets äquivalent einer Lichtstrahlung aus der Fläche der Austrittspupille, wenn dieser in allen Punkten die Leuchtkraft des zum Bildpunkte konjugierten Objektpunktes oder eine $(n_2/n_1)^2$ mal so große Leuchtkraft beigelegt wird.

5c) Maximale Helligkeit subjektiv beobachteter und Intensität objektiv entworfener Bilder. Beobachtet man das vom System entworfene Bild A'B' (Fig. 18) subjektiv, so tritt die Augenpupille rs in Konkurrenz mit der Austrittspupille c'd' des Systems. Es falle rs dem Orte nach mit c'd' zusammen. Ist rs < c'd' so kann man von der Augenpupille absehen, ist dagegen rs > c'd' so wirkt die Austrittspupille wie eine vor die Augenpupille gesetzte körperliche Blende.

Wir wollen zunächst den Fall behandeln, daß das Objekt und demnach auch das Bild A'B' eine flächenhafte Ausdehnung habe, so daß auch das Netzhautbild eine große Anzahl von Netzhautelementen bedeckt. Bekanntlich gilt in bezug auf eine selbstleuchtende ausgedehnte Fläche, welche man direkt betrachtet, daß ihre Helligkeit proportional der Pupillengröße des Auges, im übrigen aber unabhängig von der Entfernung und Lage der Fläche ist. Abgesehen von der Intensität, welche dem Bilde A'B' beizulegen ist, hängt somit die Bildhelligkeit lediglich von der Größe des wirksamen Teiles der Augenpupille rs ab.

Bei den meisten optischen Apparaten ist der Brechungsquotient des Bildmediums (Luft) = 1 ($n_2 = 1$) und, mit Ausnahme des Immersionssystems beim Mikroskop auch der des Objektmediums $n_1 = 1$. Demnach leuchtet jeder Bildpunkt höchstens mit derselben Leuchtkraft, welche dem konjugierten Objektpunkte eigen ist, beim Immersionsmikroskop dagegen mit geringerer Intensität, da hier $n_1 > n_2$ also $(n_2/n_1)^2 < 1$ ist.

Falls also die Augenpupille am Orte der Austrittspupille sich befindet, ist die Helligkeit des Bildes höchstens gleich der des direkt betrachteten Objektes, solange die Austrittspupille an Größe die Augenpupille übertrifft. Die Helligkeit des Bildes wird dagegen kleiner als die des direkt beobachteten Objektes, falls die Austrittspupille kleiner als die Augenpupille ist. Dabei verhält sich die Bildhelligkeit zur Objekthelligkeit wie die Oberfläche ω der Austrittspupille zur Oberfläche O der Augenpupille. Als Normalvergrößerung bezeichnet man diejenige, bei welcher

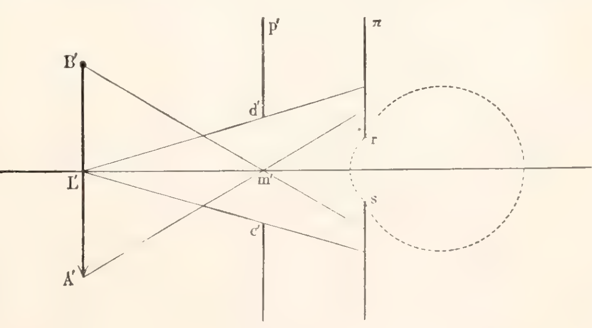


Fig. 18.

$\omega = O$ ist. Für Vergrößerungen kleiner oder gleich der Normalvergrößerung ist die Bildhelligkeit gleich der des direkt gesehenen Objektes; für stärkere Vergrößerung ist die Helligkeit des Bildes nur ω/O so groß wie die des direkt betrachteten Objektes.

Wir erhalten somit den außerordentlich wichtigen, ganz allgemein für jede Kombination optischer Systeme gültigen Satz:

Durch keine noch so sinnreich erdachte Kombination optischer Systeme und Apparate kann ein Bild von einem Objekt erzielt werden, welches heller erscheint als das direkt gesehene Objekt.

Aber auch für die Intensität objektiver Bilder läßt sich beweisen, daß sie, selbst im Brennpunkte einer Linse, höchstens der des konjugierten Objektpunktes gleich kommen kann. In diesem Falle, welcher am besten durch das Brennglas verkörpert wird, muß man der Austrittspupille Punkt für Punkt diejenige Leuchtkraft beilegen, welche dem Bildpunkte selbst zuzuschreiben wäre, d. h. also die $(n_2/n_1)^2$ mal so große Leuchtkraft des konjugierten Objektpunktes.

Ist wieder $n_2 = n_1 = 1$, und nehmen wir der Einfachheit wegen an, daß die Leuchtkraft längs des ganzen Objektes dieselbe ist, so ist die Austrittspupille gleichmäßig mit derselben Intensität zu belegen, die dem Objekte eigen ist. Die Wirkung in einem Punkte L^1 des Bildes $A'B'$ wird demnach höchstens jener gleich kommen können, die man erhalten würde, wenn man sich dem Objekte so weit nähern könnte, daß es unter demselben Winkel erscheint, wie die Austrittspupille $c'd'$ von L^1 aus. Ganz allgemein können wir also aussagen:

Durch keine noch so sinnreich erdachte Kombination optischer Systeme und Apparate kann die Energie oder die Leuchtkraft am Orte eines Bildpunktes größer sein, als die Energie oder die Leuchtkraft im konjugierten Objektpunkte selbst.

5 d) Ziel und Zweck optischer Apparate. Da durch Verwendung optischer Apparate (Lupe, Fernrohr, Mikroskop, Brennglas usw) weder an Helligkeit bei subjektiver Beobachtung noch an Intensität bei der Projektion flächenhafter Bilder gewonnen wird, so darf man mit Recht fragen, welches der Zweck und Nutzen der optischen Apparate ist.

Der Nutzen besteht lediglich in der Möglichkeit, durch optische Systeme Lagen- und Größenänderungen der Objekte hervorzubringen, ohne wesentliche Verluste an Helligkeit und Intensität zu erleiden.

Alle optischen Vorrichtungen und Lichtkonzentrationen können nur das Ziel verfolgen, mit Hilfe einer gegebenen Lichtquelle (Objekt) von kleinen Dimensionen oder an einem sehr entfernten Orte dennoch einen solchen Effekt zu bewirken, wie er ohne Vorrichtung direkt nur durch eine gleich helle (intensive), ausgedehntere oder in größerer Nähe befindliche Lichtquelle erreichbar wäre.

5e) Intensität und Helligkeit punktförmiger Gebilde Blicken wir einen Lichtpunkt an, dessen Bild auf der Netzhaut nur ein Netzhautelement erregt, so ist die Helligkeit proportional der Pupillenfläche einerseits und umgekehrt proportional dem Quadrate der Entfernung vom Auge andererseits. Hierbei ist es gleichgültig, ob das gesamte Licht nur einen Punkt eines Netzhautelementes trifft oder ob das Licht das ganze Netzhautelement ausfüllt. Es summiert unser Bewußtsein gleichsam die verschiedenen Reize an den verschiedenen Stellen eines und desselben Elementes der Netzhaut, so daß wir nur die Summe aller Reize empfinden. Es gilt somit obiges Gesetz der Helligkeitsänderung auch noch für ein nicht punktförmiges Objekt, so lange es unter so kleinem Winkel erscheint, daß sein Bild nur ein Netzhautelement einnimmt. Man kann den Winkel seiner scheinbaren Größe zu einer Minute festsetzen, da unter solchem Winkel die lichtempfindlichen Elemente, Stäbchen und Zapfen vom Knotenpunkte des Auges aus erscheinen.

Ebenso groß darf natürlich auch der Zerstreuungskreis sein, den ein optisches System und das Auge gemeinschaftlich von einem Lichtpunkte erzeugen, ohne daß jenes Gesetz seine Gültigkeit verliert. Ja, unter Berücksichtigung der eigentümlichen Lichtverteilung im Zerstreuungskreise bleibt jenes Helligkeitsgesetz auch noch bestehen, wenn der Zerstreuungskreis mehr als ein Netzhautelement einnehmen sollte; hier gibt es aber eine Grenze, über welche hinaus das aufgestellte Helligkeitsgesetz für Lichtpunkte (von mir Punktgesetz genannt) nicht mehr gilt, vielmehr das für ausgedehnte Flächen zur Geltung kommt. Solche Betrachtungen sind wichtig bei der Frage nach der Helligkeit der durch künstliche optische Systeme entworfenen Bilder, speziell bei der Frage nach dem Nutzen, den eine Vergrößerung der Dimensionen eines Objektivs mit sich bringt (vgl. O. Lummer „Einiges zur Korrektion dioptrischer Systeme“ Verhdlgn. d. D. Phys. Ges. S. 24, 1895).

Wendet man Riesenfernrohre an, in denen Sterne auch bei sehr starker Vergrößerung auf der Netzhaut als Punkte im obigen Sinne abgebildet werden, so gewinnt man so viel an Helligkeit, wie das Objektiv die Pupille an Größe übertrifft. Man hat gleichsam die Pupille vergrößert. Die Folge davon ist, daß man mit dem Fernrohr Sterne sieht, die infolge ihrer Lichtschwäche ohne Instrument nicht sichtbar sind.

6. Abbildungsgesetze für nichtselbstleuchtende Objekte. 6 a) Abbildungsvor-

gang bei der Bildentstehung nichtselbstleuchtender Objekte im Vergleich zur Abbildung selbstleuchtender Flammen. Wir haben gesehen, daß die geometrische Optik nur als anschaulichste Darstellung einer gewissen Gattung optischer Erscheinungen aufgefaßt werden muß, deren Geltungsbereich nur so weit geht, wie ihre Resultate durch die Wellentheorie bestätigt werden. Darüber hinaus bleiben alle Folgerungen aus ihr, wenn auch nicht ohne Wert, so doch ohne zwingende Gültigkeit. Beim vorliegenden Thema, die Abbildungsgesetze nichtselbstleuchtender oder opaker Gegenstände aufzufinden, sind wir an der Grenze der Leistungsfähigkeit der geometrischen Optik angelangt. Die nach den geometrischen Regeln bestimmte punktweise Abbildung eines Objektes deckt sich nicht mehr mit der Erfahrung, wenn das Objekt mittels reflektierten oder durchfallenden, kurz mittels „erborgten“ Lichtes leuchtet.

Auf diese prinzipiellen Unterschiede zwischen der Abbildung selbstleuchtender und nichtselbstleuchtender Objekte hat zuerst E. Abbe hingewiesen, welcher bei der mikroskopischen Bilderzeugung auf Widersprüche zwischen der Erfahrung einerseits und den Schlußfolgerungen aus der geometrischen Optik andererseits stieß.

Wir wollen jetzt die bei der Abbildung nichtselbstleuchtender Objekte weiter oben schon angedeuteten Vorgänge etwas näher betrachten. Es sei in Figur 19 Pp ein teilweise durchsichtiges Objekt, etwa ein Draht- oder Glasgitter, wie sie zu Beugungsversuchen Verwendung finden, und Ll eine Flamme. Wie auch die von den verschiedenen Flammenpunkten. Die von einem Objektpunkte p kommenden Strahlenbüschel besitzen demnach keine Wellenfläche mit interferenzfähigen Elementarwellen. Es kann somit auch der zu p konjugierte Lichtpunkt nicht die Grenze der Beugungsfigur jener Fläche sein, welche wir bei interferenzfähigen Strahlen als Wellenfläche bezeichnet haben

Weiter lehrt Figur 19, daß gerade die von verschiedenen Objektpunkten p, P usw. kommenden, in den verschiedenen Strahlenbüscheln analog gelegenen Strahlen, also ps und PS, pr und PR usw., untereinander kohärent sind und interferenzfähige Wellenflächen besitzen, da ja diese Strahlen stets von nur einem Flammenpunkte L oder q usw herrühren.

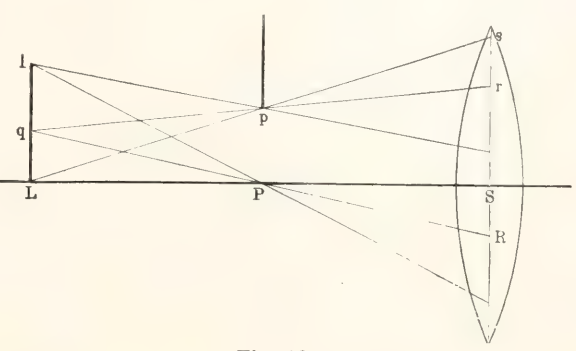


Fig. 19.

Nach welchen Gesetzen auch die Abbildung des Objektes Pp vor sich gehen möge, eins ist sicher, daß die Flamme Ll nach den Regeln der geometrischen Optik abgebildet werden muß, d. h. es entspricht jedem Punkte L und l (Fig. 20) der Flamme wiederum ein Bildpunkt L′ und l′ mit dem der Oeffnung op zukommenden Beugungsphänomen überlagert.

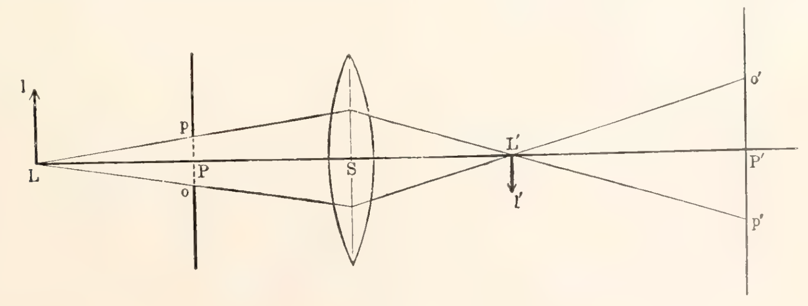


Fig. 20.

einzelnen Flammenpunkten l q L ausgehenden Strahlen durch die transparenten Stellen des Objektes Pp hindurchgehen mögen, jedenfalls schneiden sich an jeder solchen Stelle p des Objektes Strahlen von

Ist das Objekt P eine kreisförmige Oeffnung (op), so ist das Bild jedes Punktes der Flamme Ll ein Lichtscheibchen mit

konzentrischen Ringen. Je größer die Oeffnung op wird, um so mehr schrumpft auch das Scheibchen zu einem Punkte zusammen. Kurz, es gelten für die Abbildung der Flamme die früher abgeleiteten Gesetze für selbstleuchtende Objekte. Das Flammenbild ist also bei jeder Art des begrenzenden Objektes P konstruierbar.

Dieses Bild ist von geringem Interesse, wenn es auf eine Abbildung des Objektes oPp abgesehen ist. Man will in diesem Falle vielmehr diejenige Lichtverteilung kennen lernen, welche in der zum opaken Objekt oPp, im geometrischen Sinne, konjugierten Ebene auftritt. Diese Ebene sei P′ und es sei o′P′p′ das zu oPp konjugierte Bild, falls das Objekt ein Selbstleuchter wäre.

Fig. 21.

Da in das System S nur dasjenige Licht gelangt, welches von der Flamme ausgegangen und vom Objekt als Oeffnung begrenzt ist, so müssen dieselben Strahlen, welche das Bild L′l′ der Flamme bilden, in ihrem weiteren Verlaufe auch die Lichtverteilung bei P′p′ ausmachen. Somit haben wir auch schon einen Schritt zur Lösung unserer Aufgabe getan. Dieselben Wellenflächen, deren Elementarwellen das Flammenbild L′l′ formieren, müssen eben auch Ursache der Lichtverteilung in allen Ebenen hinter L′l′, also auch in der zu oPp konjugierten Ebene o′P′p′ sein. Es kann daselbst keine andere Energie fließen als die, welche zum Flammenbild L′l′ gegangen ist. Die Abbildung des opaken Objektes oPp ist demnach sekundär, wenigstens im Vergleich zu der primären der Flamme, und zwar ein Interferenzphänomen, welches neben der Abbildung der Flamme hergeht und von den das Flammenbild formierenden Elementarstrahlen erzeugt wird.

Bei der mikroskopischen Abbildung sind die betrachteten nichtselbstleuchtenden Objekte Pp meist von so feiner Struktur oder von so winziger Ausdehnung, daß das auffallende Licht der Flamme Ll an ihnen eine beträchtliche Beugung erfährt. Will man also eine enge Oeffnung, ein Drahtgitter oder ein Glasgitter mit engen Streifenabständen abbilden, so muß man erst erörtern, welches die Beugungserscheinung ist, die das Gitter von der Flamme erzeugt, und ferner, welches das vom System S bei P′ erzeugte Abbild jener Beugungserscheinung, d. h. also der durch das Gitter begrenzten Flamme ist. Wir werden somit unabsichtlich auf das Studium von Erscheinungen geführt, welche man absichtlich bei den sogenannten Fresnelschen oder Fraunhoferschen Beugungserscheinungen hervorruft. Bei diesen Erscheinungen blickt man nämlich nach einer Lichtquelle durch eine enge beugende Oeffnung hindurch. Hier sieht man gleichsam durch das mikroskopische Objekt nach der Flamme.

6b) Berechnung des Interferenzbildes aus dem primären Beugungsbild eines Gitters. Es sei in Figur 21 das Objekt P ein Gitter mit zur Zeichnungsebene senkrechten äquidistanten Gitterstäben, S das abbildende System und L ein auf der Systemachse im Unendlichen leuchtender Punkt. Ohne Gitter

würde vom unendlich fernen Lichtpunkt L in der Brennweite von S bei L' ein punktweises Abbild entstehen. Mit Gitter entsteht in der Brennebene das Fraunhofersche Beugungsbild des Gitters, also bei L' das nullte Beugungsspektrum, bei L_I' und L_I' die Spektra erster Ordnung usw, in denen sich die unter den Winkeln u_1 usw gebeugten parallelen Büschel zu Maximis vereinigen. Die Spektra L_1', L_2' usw sind die reellen Bilder der virtuellen Beugungsspektra L_1, L_2 usw. Die Hauptstrahlen der Beugungsbüschel gehen nach der Brechung durch den zu P konjugierten Punkt P'. Ehe wir die Interferenzwirkung daselbst berechnen, wollen wir an die Gesetze der primären Abbildung erinneren. Dabei werde vorausgesetzt, daß das System S in bezug auf die Punkte P und P' aplanatisch sei, so daß für konjugierte Divergenzwinkel u und u' die Sinusbedingung erfüllt ist. Dabei seien die Winkel u und u' so klein, daß statt der Sinus die Winkel gesetzt werden dürfen. Außerdem sei der Brechungsquotient des Bildmediums gleich Eins, die Brennweite von S gleich f, die Wellenlänge des Lichtes gleich λ und e der Abstand benachbarter Gitterstreifen. Dann wird der Abstand $L_m'L' = \varepsilon_m$ des m ten Beugungsspektrums

$$\varepsilon_m = m\frac{f\,.\,\lambda}{e}$$

Die Interferenzspektra L' L'_1 L'_2 usw sind somit gleich weit voneinander entfernt, und zwar um so weiter, je kleiner der Streifenabstand e und je größer die Brennweite f und die Wellenlänge λ des Lichtes ist.

Um die Interferenzwirkung dieser Spektra in der zu P konjugierten Ebene P' zu berechnen, nehmen wir an, daß die Bildebene P' so weit von der Brennebene B' abliege, daß die Entfernung $l = P'L'$ im Vergleich zum seitlichen Achsenabstande ε_m des äußersten noch wirksamen Beugungsspektrums als unendlich groß anzusehen ist. Annähernd ist dies beim Mikroskop stets erfüllt. Dann können alle von den einzelnen Beugungsspektren L nach einem und demselben Punkte p' der Bildebene hinzielenden Elementarstrahlen als untereinander parallel angesehen werden. Soweit die Beugungsspektra einem leuchtenden Punkte zugehören, sind die von ihnen ausgehenden Elementarstrahlen kohärent, also interferenzfähig; demnach muß in allen jenen Punkten p' der Bildebene P' die Lichtwirkung infolge der Interferenz der Elementarwellen ein Maximum oder ein Minimum sein, für welche der Gangunterschied einem geraden oder ungeraden Vielfachen der halben Wellenlänge gleich wird. In den zwischen diesen Maximis und Minimis gelegenen Bildpunkten hebt sich die Wirkung der Elementarstrahlen nur teilweise auf. Wir übersehen somit ohne weiteres, daß infolge der Interferenz der von den Beugungsspektren herrührenden kohärenten Elementarstrahlen die Lichtverteilung in der Bildebene P' jedenfalls aus abwechselnd hellen und dunklen Streifen bestehen muß, analog der Lichtverteilung in der Objektebene.

Ist β_0 die Linearvergrößerung des Systems im Ebenenpaar P und P', so gilt für den Abstand e' zweier Bildmaxima

$$e' = \beta_0\,.\,e \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (5)$$

wenn e den Abstand zweier benachbarten Beugungsspektra bedeutet.

Zunächst bemerken wir, daß der Streifenabstand im Interferenzbilde unabhängig von der Wellenlänge des Lichtes geworden ist. Aus den bei weißer Lichtquelle durch das Objektgitter erzeugten farbigen Beugungsspektren entwickelt sich somit ein farbloses Interferenzbild („Abbild“) aus abwechselnd weißen und dunklen Streifen, deren Abstand gemäß der Vergrößerung des Mikroskopobjektivs vergrößert ist.

Dieses Interferenzbild ist einzig und allein das vom nichtselbstleuchtenden Gitter P bei Vorhandensein der Lichtquelle L durch das System in der zu P konjugierten Ebene P' erzeugte „Abbild“. Es deckt sich somit die berechnete Lichtverteilung mit derjenigen, welche man erhält, wenn man das Bild vom Objektgitter nach den Regeln der geometrischen Optik bestimmt.

Diese elementare Berechnung führt zum gleichen Resultat, gleichviel ob alle Spektra oder nur zwei unmittelbar benachbarte wirksam sind. Um die Abbildungsgesetze nichtselbstleuchtender Objekte und ihre Abweichung von den Gesetzen der geometrischen Optik kennen zu lernen genügt also die einfache Theorie nicht. Schon das eben abgeleitete Resultat bedarf eines wichtigen Zusatzes, wie wir sehen werden.

6c) Die Abbesche Lehre von der Bildentstehung im Mikroskop. Die allgemeine Theorie [1]) ist viel zu kompliziert, als daß sie hier ausführlich wiedergegeben werden könnte. Es dreht sich darum, den allgemeinen Ausdruck für die Lichterregung in einem beliebigen Punkte P' (Aufpunkt) des sekundären Interferenzbildes in der zu P (Fig. 22 und Fig. 21) konjugierten Ebene aufzustellen und zu diskutieren.

Abbe leitet diesen Ausdruck auf Grund des Fresnel-Huygensschen Prinzips her und setzt im Ausdruck der Amplitude zunächst unbestimmte Funktionen an, um

[1]) Die Lehre von der Bildentstehung im Mikroskop. Von E. Abbe. Bearbeitet und herausgegeben von O. Lummer und F. Reiche, Verlag von Fr. Vieweg und Sohn, Braunschweig 1910.

dem Einfluß des Ausstrahlungswinkels, der Aenderung der Amplitude beim Durchgang durch das optische System und der Neigung der interferierenden Elementarstrahlen gegen die optische Achse Rechnung zu tragen. Zur Bestimmung dieser Funktionen wird die Sinusbedingung, das L a m b e r t sche Kosinusgesetz und das Energieprinzip benutzt.

In der von R e i c h e und von mir herausgegebenen Bearbeitung ist über A b b e hinausgegangen, um zu sehen, ob die Herleitung A b b e s nicht auf einer strengeren Basis möglich sei und zwar unter Benutzung des K i r c h h o f f schen Prinzips statt des F r e s n e l - H u y g e n s - schen und unter Verwendung der Gleichungen der M a x w e l l schen elektromagnetischen Lichttheorie.

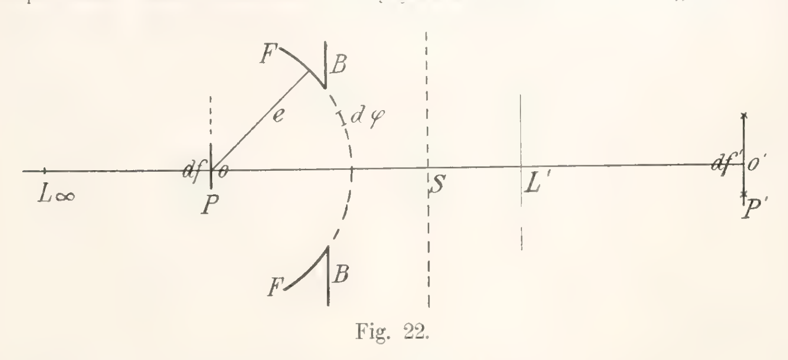


Fig. 22.

Geht man vom K i r c h h o f f schen Prinzip aus, so ist man an die im K i r c h h o f f - schen Integralausdruck vorkommende Funktion gebunden und zwar muß diese ein Integral der Wellengleichung sein. Die Gleichungen der M a x w e l l schen Lichttheorie gehen in die Herleitung des Intensitätsausdrucks ein, wenn man die Strahlung ansieht als verursacht durch Dipole. Es läßt sich zeigen, daß die von einem rotierenden Dipol ausgehende Strahlung im Mittelwert dem L a m - b e r t schen Kosinusgesetz folgt. So gelingt es, eine Funktion zu finden, die im wesentlichen die elektrische Kraft des Dipols darstellt, der das leuchtende Flächenelement ersetzt. Da diese Funktion ein Integral der Wellengleichung ist, so kann auf sie der K i r c h h o f f sche Integralsatz angewandt werden. Unter Voraussetzung kleiner Konvergenzwinkel im Bildraum erhält man auch auf diesem strengeren Wege den A b b e schen Ausdruck für die Lichterregung im Aufpunkt.

Wir wollen hier lediglich den Gang der Rechnung und das Resultat der Berechnung angeben. Dazu betrachten wir die Abbildung eines Flächenelementes df, welches auf der Achse des abbildenden Systems S (Fig. 22) gelegen sei und vom unendlich entfernten Punkt L∞ auf der Achse sein Licht erhalte. Es ist also df in Figur 22 identisch mit dem Objekt P in Figur 21; von ihm gehen interferenzfähige (gebeugte) Elementarstrahlen aus, welche in der zu L∞ konjugierten Ebene L' (Brennebene) das dem Objekt df zukommende Beugungsspektrum erzeugen und sich in der zu df konjugierten Ebene df' zum sekundären Interferenzbild zusammensetzen. Es mögen die von df ausgegangenen Elementarstrahlen begrenzt sein durch die körperliche Blende B. Vom Achsenpunkt o des Elements df schlagen wir die Kugelfläche FF mit dem Radius e so, daß sie die Oeffnung der Blende B tangiert und bezeichnen ein Element dieser „Zwischenfläche“ mit $d\varphi$. Es habe ein Punkt P des Elementes df die Coordinaten x, y, das Element $d\varphi$ die Coordinaten ξ, η bezogen auf P als Coordinatenanfang. Ferner strahle Element df nach dem L a m b e r t - schen Cosinusgesetz. Es ist dann bei gewissen Vernachlässigungen die Lichterregung in einem beliebigen Aufpunkte P' gegeben durch die Gleichung

$$s = \frac{K}{\lambda} \int\!\!\int \frac{d\xi\, d\eta}{e^2} \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x\xi + y\eta}{e\lambda} \right)$$

wo λ die Wellenlänge des Lichtes und K eine Konstante bedeutet, und mit $\sin 2\pi \frac{T}{t}$ die Lichtbewegung am Orte von df dargestellt ist. Die Integration ist zu erstrecken über die Projektion des „wirksamen Stücks“ der Zwischenfläche FF auf die Ebene der Blendenöffnung. Als wirksames Stück ist das von der Blende B aus der Kugelfläche FF ausgeschnittene Stück zu verstehen. Je größer dieses wirksame Stück ist, um so mehr Strahlen von df tragen zur Abbildung bei.

Ist das Flächenelement df nicht auf der Systemachse gelegen, sondern nahe der Achse, so ist die durch dieses „außeraxiale“ Flächenelement bei P' hervorgerufene Lichterregung dargestellt durch den Ausdruck

$$s' = \frac{K}{\lambda} \int\!\!\int \frac{d\xi\, d\eta}{e^2} \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{(x-X)\,\xi + (y-Y)\eta}{e\lambda} \right) \quad . \; . \; (6)$$

wo X Y die Coordinaten des außeraxialen Elements bedeuten und K wieder eine Konstante ist.

In Wirklichkeit haben wir es mit der Abbildung eines kleinen flächenhaften Objektes zu tun, dessen verschiedene Flächenelemente kohärente Wellenzüge aussenden. Die Lichterregung S, welche alle diese einzelnen Elemente im Aufpunkt P^1 hervorrufen, ist dann

$$S = \frac{K}{\lambda^2} \iint\limits_{\text{Objekt}} dX\,dY\,\varphi(XY) \iint\limits_{\text{Begrenzung}} d\xi'\,d\eta' \sin 2\pi \left[\frac{t}{T} - \frac{\xi'(x - X) + \eta'(y - Y)}{\lambda} - \psi(XY)\right] \quad (7)$$

wo $\xi' = \frac{\xi}{e}$, $\eta' = \frac{\eta}{e}$ gesetzt ist.

Der Faktor φ trägt Rechnung der Durchlässigkeit des abzubildenden Objektes. Bei einem Gitter mit abwechselnd durchlässigen und undurchlässigen Intervallen wechselt der Wert von φ sprungweise zwischen 1 und 0. Der Faktor ψ trägt Rechnung einer etwa vorhandenen Phasendifferenz zwischen den einzelnen Elementen der abzubildenden Fläche.

Die Formel (7) enthält, wie man leicht sieht, implizite die Tatsache, daß die Lichtbewegung im Punkt XY des abzubildenden Objekts dargestellt ist durch den einfachen Ausdruck:

$$K\,\varphi\,(XY) \sin 2\pi \left[\frac{t}{T} - \psi(XY)\right] \; . \; . \; . \; (8)$$

welcher gleichsam nach Phase und Amplitude ein Symbol des Objekts darstellt.

Bei der Ausführung der Integration kann man wie folgt verfahren. Man integriert zunächst über die Zwischenfläche ($\xi'\eta'$) und dann über das Objekt (XY). Die erste Integration liefert die Beugungswirkung der begrenzten Oeffnung in der Objektebene bei Vorhandensein eines Objektelementes, die zweite Integration trägt der Ausdehnung des Objektes Rechnung.

Die Entstehungsweise des Abbildes wird physikalisch anschaulicher, wenn man die Reihenfolge der Integration umkehrt und zuerst die Integration über das Objekt XY ausführt. Dies liefert unmittelbar die Beugungswirkung des nichtselbstleuchtenden Objektes am Orte der Zwischenfläche. Ist das Objekt z. B. ein Gitter, so treten in der Zwischenfläche die bekannten Beugungsspektra auf, deren Lage von der Gitterkonstante und dem Einfallswinkel des Lichtes abhängt. Nach Ausführung der ersten Integration kann man daher sowohl von der Lichtquelle wie vom Objekt abstrahieren; beide sind ersetzt durch die in der Zwischenfläche auftretenden Beugungsspektra.

Der zweiten Integration über $\xi'\eta'$ fällt also nur die Rolle zu, die Interferenzwirkung dieser Beugungsspektra im Aufpunkte $P'(xy)$ der Objektebene zu berechnen.

Die resultierende Erscheinung (Abbild) ist also die Interferenzwirkung einer Beugungserscheinung. Zur Bestimmung des Abbildes muß der Ausdruck (7) für S nach Einsetzung der Integrationsgrenzen explizite berechnet werden.

Bei Vorhandensein eines Objektes von komplizierter Struktur ist die Berechnung von S wohl kaum durchführbar. Dagegen lassen sich auch dann allgemeine Regeln herleiten, welche angeben, unter welchen Bedingungen ein dem vorhandenen Objekt ähnliches Abbild auftritt, oder welchem fingierten Objekt statt des vorhandenen die auftretende Erscheinung ähnlich ist. Es ergeben sich die folgenden Resultate:

Umfaßt die Apertur des abbildenden Systems alle am Objekte gebeugten Strahlen von noch zu berücksichtigender Wirkung, so erzeugt das System in der zum nichtselbstleuchtenden Objekt konjugierten Ebene ein nach Struktur und Phase vollkommen ähnliches Abbild.

Liegen dagegen außerhalb der Apertur gebeugte Strahlen von nicht zu vernachlässigender Amplitude, oder blenden wir aus dem von der Apertur umfaßten Beugungsphänomen einzelne Teile künstlich heraus, so hört die Aehnlichkeit des Abbildes auf, und wir erhalten unter Umständen ein selbst in bezug auf die Struktur unähnliches Abbild. Welche Abblendung man aber auch wählt, und welche Apertur bei gegebenem Objekt man auch benutzt, in allen Fällen läßt sich ein Satz ableiten, der ganz allgemein die Art der Unähnlichkeit bestimmt.

Dazu fingieren wir ein neues Objekt (O_f), dessen natürliches und vollständiges Beugungsphänomen übereinstimme mit dem durch Abblendung usw. künstlich unvollständig gemachten Beugungsphänomen des realen Objektes (O_r).

In bezug auf die Unähnlichkeit kann dann folgender allgemeine Satz ausgesprochen werden:

Das Abbild des gegebenen Objektes O_r ist identisch mit dem absolut ähnlichen Abbild desjenigen fingierten Objektes O_f, welches gerade den von der Oeffnung des Systems aufgenommenen Teil des Beugungsphänomens von O_r als vollständiges Beugungsphänomen erzeugen würde.

6d) Numerische Apertur und Grenze der Leistungsfähigkeit. Die numerische Apertur ist nach Abbe gleich dem Produkt n.sin U aus dem Brechungsquotienten n des Objektmediums und dem Oeffnungswinkel U der abbildenden Büschel maßgebend für die Lichtmenge, welche das optische System S vom Objektelement zum konjugierten Bildelement hinführt. Die Beziehung zwischen der numerischen Apertur und dem Grade der Bildähnlichkeit läßt sich am übersichtlichsten für den Fall der Abbildung eines nichtselbstleuchtenden Gitters erläutern. Ist λ die Wellenlänge des Lichtes und γ die Gitterskonstante, so ist die Anzahl h der Beugungsspektra innerhalb des Oeffnungswinkels gegeben durch

$$h = n \sin U \frac{\gamma}{\lambda} \; . \; . \; . \; . \; . \; (9)$$

Wie wir wissen, ist die Aehnlichkeit des Bildes um so größer, je größer h ist; die ideale Aehnlichkeit wird erreicht für $h = \infty$. Bei gegebenem Gitter (γ) und gegebener Wellenlänge (λ) des auffallenden Lichtes ist die Anzahl (h) der vom Oeffnungswinkel aufgenommenen, also zum Bilde beitragenden

Beugungsmaxima proportional der numerischen Apertur.

Es folgt somit der wichtige Satz: Haben zwei Systeme die gleiche numerische Apertur

$$n_1 \sin U_1 = n_2 \sin U_2,$$

so bilden sie das gleiche Objektgitter mit dem gleichen Grade der Aehnlichkeit ab. Hierdurch erkennt man wiederum die Bedeutung der numerischen Apertur, da nicht der Oeffnungswinkel U des Systems, sondern das Produkt n.sin U für die Aehnlichkeit der Abbildung maßgebend ist.

Umfaßt der Oeffnungswinkel U des Systems bei gegebenen λ und γ, als Trockensystem (n = 1) benutzt, nicht alle Beugungsmaxima bis zu verschwindender Intensität, so ist die Abbildung unähnlich; sie kann dann in eine ähnlichere verwandelt werden, wenn man dasselbe System als Immersionssystem benutzt ($n > 1$).

Die Aehnlichkeit des Abbildes wird noch mehr gesteigert, wenn man λ verkleinert.

Bei gegebener numerischer Apertur eines Systems und gegebener Wellenlänge ist die Aehnlichkeit des Gitterbildes allein durch die Gitterkonstante γ bedingt. Je größer γ genommen wird, um so mehr Beugungsmaxima tragen zur Bilderzeugung bei, um so größer wird die Aehnlichkeit. Die maximale numerische Apertur eines Systems wird für U = 90° erreicht und nimmt den Wert n an.

In diesem Falle maximaler Leistungsmöglichkeit gilt also

$$h = n \frac{\gamma}{\lambda}$$

Bezeichnen wir mit h_l das letzte Beugungsspektrum von noch zu berücksichtigender Intensität und Helligkeit, so wird das System mit der Apertur n absolut ähnlich abbilden alle Gitter, für welche gilt

$$\gamma \geq \frac{h_l . \lambda}{n}$$

Ein Gitter mit kleinerer Gitterkonstante ($\gamma' < \gamma$) wird somit von diesem System nicht mehr ähnlich abgebildet.

Als Beispiel wollen wir annehmen, es sei $\lambda = 350\ \mu\mu$, n = 1,56 und $h_l = 10$, unter der Annahme, daß die Maxima mit einer Intensität kleiner als 1 Prozent des mittelsten zum Bilde nichts beitragen. Dann wird die Konstante des noch eben absolut ähnlich abgebildeten Gitters (Grenzgitter) γ = etwa 2 μ. Lassen wir γ von diesem Grenzwert stetig abnehmen, so wird die Anzahl der zum Bilde beitragenden Maxima immer geringer und die Abbildung immer unähnlicher.

Als Grenze der Leistungsfähigkeit des abbildenden Systems wollen wir festsetzen diejenige Unähnlichkeit, bei welcher gerade noch Struktur zum Vorschein kommt d. h. bei welcher die Strichzahl des Objektgitters richtig wiedergegeben wird ohne Rücksicht auf die Art der Striche. Es läßt sich zeigen, daß die Struktur gerade noch zum Vorschein kommt, wenn außer dem nullten Beugungsspektrum noch das erste Spektrum rechts oder links mitwirkt. Dieser niedrigste Grad der Aehnlichkeit wird erreicht bei schiefer Beleuchtung und einer Gitterkonstanten

$$\gamma = \frac{\lambda}{2n \sin U} \quad \cdots\cdots \quad (10)$$

Mit diesem Werte ist die Grenze der Auflösungsfähigkeit eines mikroskopischen Systems erreicht.

Bekanntlich kam Helmholtz fast zu gleicher Zeit, wenn auch auf anderem Wege, zur gleichen Grenze der Leistungsfähigkeit.

6e) Abbildung eines nichtselbstleuchtenden Gitters bei künstlicher Abblendung. Um die Art der Abbildung und vor allem den Grad der Aehnlichkeit des Abbildes bei künstlicher Abblendung kennen zu lernen, haben wir den typischen Fall durchrechnen lassen, in welchem das mikroskopische Objekt durch ein Gitter mit äquidistanten Stäben dargestellt ist (M. Wolfke, Dissertation, Breslau 1910, Ann. d. Phys. 1910).

Wir betrachten im folgenden mehrere Spezialfälle, die durch Einführung von Integrationsgrenzen im allgemeinen Ausdruck entstehen und durch geeignete Abblendung aus dem Beugungsbilde des Gitters verwirklicht werden.

Fall I. Nur das nullte Spektrum (Zentralbild) gelangt zur Wirkung. Blendet man im primären Beugungsbilde des Gitters alle seitlichen Maxima bis auf das ungebeugte Zentralbild (nulltes Maximum) ab, so zeigt das sekundäre Abbild des Gitters eine etwas verbreiterte strukturlose Fläche, deren Helligkeit von der Mitte nach den Rändern abnimmt. An den beiden Seiten der strukturlosen Fläche treten Nebenmaxima von sehr geringer Helligkeit ($^1/_{25}$) auf.

Fall II. Außer dem Zentralbild gelangen die ersten Maxima rechts und links zur Wirkung. Für diesen Fall zeigt das Abbild Struktur. Die Anzahl der Gitterstriche ist im Abbilde richtig wiedergegeben, dagegen ist der Intensitätsabfall vom Maximum zum Minimum ein allmählicher und die Maxima und Minima erscheinen gleich breit. Außerdem treten, unter Umständen, in den Mitten der Minima noch sekundäre Nebenmaxima auf.

Fall III. Nur die beidersei-

tigen i^{ten} Maxima tragen zur Abbildung bei. Das Zentralbild ist abgeblendet. Wir erhalten ein unähnliches Abbild des Objektes, da an Stelle der N wirklich vorhandenen Gitterstriche deren 2 Ni auftreten. Der Intensitätsabfall vom Maximum zum Minimum folgt dem Gesetze $\cos^2 u$.

Außer den hier reproduzierten Spezialfällen sind in der Wolfkeschen Dissertation noch folgende Fälle durchgerechnet: 1. Alle Beugungsspektra abgeblendet bis auf das Zentralbild und die beiden i^{ten} Maxima; 2. alle Beugungsspektra abgeblendet bis auf die beiden i^{ten} und die beiden $2\,i^{ten}$ Maxima; 3. alle Beugungsspektra abgeblendet bis auf die beiden i^{ten}, die beiden $2i^{ten}$ und das Zentralbild.

7. Experimentelle Prüfung der Abbeschen Theorie. Da die im vorigen Abschnitt angeführten Spezialfälle erst kürzlich ausgerechnet worden sind, so mußte die Frage experimentell beantwortet werden, ob die immerhin unter sehr vereinfachenden Annahmen entwickelte Abbesche Theorie auch bis in ihre Einzelheiten durch das Experiment bestätigt wird. Zur Prüfung benutzten Reiche und ich ein Zeißsches Mikroskop, welches mit dem für diese Zwecke konstruierten Objektiv aa von 26 mm Brennweite versehen ist. Als Objekt diente die sogenannte Abbesche Diffraktionsplatte, welche mit mikroskopischen Gittern (in Silber geritzt) verschiedener Gitterkonstanten versehen ist. Man beobachtet wie folgt: Ohne Benutzung des Kondensors beleuchtet man mittels der Nernstlampe oder der Heräusschen Hg-Dampflampe das abzubildende Gitter und stellt das Mikroskop möglichst scharf auf die Gitterstriche ein. Dies ist im allgemeinen bei mikroskopischen Objekten recht schwierig. Im Falle der Diffraktionsplatte existieren zwei Kriterien dafür; erstens die Inhomogenitäten (Risse, Staubteilchen usw.) auf der Oberfläche des Silbergitters und zweitens die Tatsache, daß nur bei richtiger Einstellung das Abbild des mit weißem Licht beleuchteten Gitters wiederum farblos erscheint. Dieses Kriterium ist bei allen mikroskopischen Objekten anwendbar, soweit sie nicht selektiv absorbieren.

Nachdem die exakte Einstellung bewirkt ist, entfernt man das Okular und betrachtet, direkt in den Tubus blickend, das im Innern oberhalb des Objektivs in dessen Brennebene gelegene reelle Beugungsspektrum (Abbild der Lichtquelle). Im Falle des von uns benutzten Gitters sieht man daselbst das Zentralbild mit 4 bis 5 Hauptmaximis (Beugungsspektren) zu beiden Seiten des Zentralbildes. Es wirken also auch bei Benutzung der vollen Apertur nicht alle Beugungsspektra bis zu verschwindender Intensität mit. Dementsprechend ist auch das Abbild kein vollständig ähnliches. Wohl ist im großen ganzen das Verhältnis von Spaltbreite zur Stegbreite richtig wiedergegeben; dagegen ist das Abbild jedes in Wirklichkeit undurchsichtigen Steges nicht absolut dunkel, vielmehr durchzogen von drei relativ hellen, feinen Lichtlinien. Es steht diese Erscheinung im Einklang mit der entwickelten Theorie, wie eine Erweiterung des in 6 behandelten Spezialfalles II lehrt.

Ferner ist bei Abblendung aller Spektra bis auf das nullte Spektrum tatsächlich nur eine strukturlose Fläche zu sehen. Bei Abblendung aller Spektra außer dem nullten und den ersten (rechts und links) zeigte das Abbild Struktur mit richtiger Wiedergabe der Strichanzahl. Dagegen ist das Verhältnis von Strichbreite zur Stegbreite falsch wiedergegeben, insofern der Spalt ebensobreit erscheint wie der Steg. Auch ist der Intensitätsabfall vom Maximum zum Minimum kein plötzlicher, so daß die Gitterstriche an ihren Rändern verwaschen erscheinen. Beide Resultate stehen im Einklang mit der entwickelten Theorie.

Ferner sollten infolge des Verhältnisses Spaltbreite zur Gitterkonstanten zwischen den eigentlichen Gitterspalten noch sekundäre Maxima auftreten. Tatsächlich konnten auch diese Nebenmaxima in Gestalt feiner heller Streifen beobachtet werden.

Bei Mitwirkung nur der ersten Beugungsspektra (rechts und links), d. h. bei Abblendung aller übrigen Spektra inklusive des nullten, zeigt das Abbild in Uebereinstimmung mit der Theorie doppelt soviel Gitterstriche als das Objektgitter.

Literatur. *Geschichtliches:* ***J. Priestley,*** *Geschichte und gegenwärtiger Zustand der Optik usw. Uebersetzt v. G. S. Klügel, Leipzig, J. Fr. Junius 1775.* — ***Emil Wilde,*** *Geschichte der Optik, Berlin, Rücker und Püchler, I. Teil 1838, II. Teil 1843.* — ***J. C. Poggendorff,*** *Geschichte der Physik, Leipzig, Joh. Ambr. Barth 1879.*

Zusammenhängende Darstellungen: ***G. Ferraris,*** *Die Fundamentaleigenschaften d. dioptr. Instrumente. Elementare Darstellung d. Gauss'schen Theorie usw. Uebersetzt v. F. Lippich, Leipzig, Quandt und Händel 1879.* — ***M. E. Mascart,*** *Traité d'optique, Paris, Gauthier, Villars et Fils. 3 Bde. 1889 bis 1893.* — ***P. Drude,*** *Lehrbuch der Optik, Leipzig, S. Hirzel 1900.* — ***A. Gleichen,*** *Lehrbuch der geometrischen Optik, Leipzig u. Berlin, B. G. Teubner 1902.* — ***S. Czapski,*** *Grundzüge der Theorie d. optischen Instrumente nach E. Abbe, II. Aufl. herausgegeben von O. Eppenstein, Leipzig, Joh. Ambr. Barth 1904 (Das über die charakteristische Funktion und die allgemeine Abbildungslehre Abbes Gesagte ist im wesentlichen diesem ausgezeichneten Werke entlehnt).* — ***M. v. Rohr,*** *Die Bilderzeugung in optischen*

Instrumenten vom Standpunkte d. geom. Optik. Bearbeitet von d. wissensch. Mitarbeitern an d. opt. Werkstätte von Carl Zeiß, P. Culmann, S. Czapski, A. König, F. Löwe, M. v. Rohr, H. Siedentopf, E. Wandersleb, Berlin, Jul. Springer 1904. — **O. D. Chwolson,** *Lehrbuch der Physik, Bd. II. Uebersetzt v. H. Pflaum, Braunschweig, Fr. Vieweg und Sohn 1904.* — **O. Lummer,** *Die Lehre von der strahlenden Energie (Optik) II. Bd., III. Buch, v. Müller-Pouillets, Lehrbuch der Physik, 10. Aufl., Braunschweig, Fr. Vieweg und Sohn 1909, 1189 S. (Viele Figuren und das Wesentliche des Gegebenen sind diesem Werke entnommen).* — **James P. C. Southall,** *The Principles and Methods of Geometrical Optics, New York, The Macmillan Comp. 1910.*

Gesammelte Abhandlungen und Originalwerke: **Chr. Huygens,** *Traité de la Lumière, Leiden 1690.* — **J. Newton,** *Optics, London, S. Smith and B. Walford 1704.* — **J. Newton,** *Lectiones opticae London 1728.* — **J. H. Lambert,** *Photometria sive de mensura et gradibus luminis colorum et umbrae, Augsburg, Klett 1760 (Ostwalds Klassiker der exakten Naturwissenschaften Nr. 31 bis 33).* — **G. S. Klügel,** *Analytische Dioptrik in zwei Teilen, Leipzig, J. F. Junius 1778.* — **C. F. Gauss,** *Dioptrische Untersuchungen, Göttingen, Dietrich 1841.* — **C. F. Gauss',** *Werke, 2. Abdr., Göttingen 1877.* — **A. Fresnel,** *Oeuvres Complètes, Paris, Imprimerie Impériale Bd. I 1866, Bd. II 1868, Bd III 1870.* — **H. Hankel,** *Die Elemente der projektivischen Geometrie in synthetischer Behandlung, Leipzig, B. G. Teubner 1875.* — **H. Helmholtz,** *Wissenschaftliche Abhandlungen, Bd. II, Leipzig, Joh. Ambr. Barth 1883.* — **H. v. Helmholtz,** *Handbuch d. physiologischen Optik, Hamburg und Leipzig, L. Voß 1896.* — **J. C. Maxwell,** *Scientific Papers Cambridge University, Press 1890.* — **S. Finsterwalder,** *Die von optischen Systemen größerer Oeffnung und größeren Gesichtsfeldes erzeugten Bilder, München, G. Franz 1891.* — **R. S. Heath,** *A treatise on geometrical optics Cambridge University, Press Second Edition 1895, Uebersetzung von R. Kanthack, Berlin, J. Springer 1894.* — **H. Bruns,** *Das Eikonal, Leipzig, S. Hirzel 1895.* — **G. Salmon,** *Analytische Geometrie des Raumes. Deutsche Bearbeitung von W. Fiedler, I. Teil. Die Elemente und die Theorie der Flächen zweiten Grades, Leipzig, B. G. Teubner, 1898.* — **M. v. Rohr,** *Theorie und Geschichte des photographischen Objektivs, Berlin, J. Springer 1899.* — **H. Hovestadt,** *Jenaer Glas und seine Verwendung in Wissenschaft und Technik, Jena, Gustav Fischer 1900.* — **Lord Rayleigh,** *Scientific Papers Vol. I bis IV, Cambridge The University, Press 1899 bis 1903.* — **E. Abbe,** *Gesammelte Abhandlungen Bd. I 1904, Bd. II 1906, Jena, Gustav Fischer.* — **O. Lummer und F. Reiche,** *Die Lehre von der Bildentstehung im Mikroskop von E. Abbe, Braunschweig, Fr. Vieweg und Sohn 1910.*

Abhandlungen: **G. B. Airy,** *On the spherical aberration of the eye-pieces of telescopes, Cambr. Phil. Trans. 3, 1 bis 64, 1830.* — **R. H. Bow,** *On photographic distortion. The Brit. Journ. of Phot. 1861, 8, 417 bis 419 u. 440 bis 442.* — **L. Euler,** *Sur la perfection des verres objectifs des lunettes Mém. de Berlin 1747, 3, 274 bis 296.* — **P. Fermat,** *Litterae ad P. Mersennum contra Dioptricum Cartesianum, Paris 1667 (vgl. auch Chr. Huygens, „Traité de la Lumière", Leyden 1690, S. 39).* — **W. R. Hamilton,** *Theory of systems of rays Trans., R. Irish, Academy 1828, 15, 69 bis 174, 16, 3 bis 62 u. 93 bis 126, 17, 1 bis 144.* — **Ch. Hockin,** *On the estimation of aperture in the microscope Journ., R. Micr., Soc. 1884 (2) 4, 337 bis 346.* — **J. D. Everett,** *Note on Hockins proof of the sine condition, Phil. Mag. 1902 (6) 4, 170 bis 171.* — **E. von Hoegh,** *Die sphärische Abweichung und deren Correction speziell bei Fernrohrobjektiven, Z. S. f. Instrkde. 1888, 8, 117 bis 129.* — **G. R. Kirchhoff,** *Zur Theorie der Lichtstrahlen, Berl. Ber. 1882, 641 bis 670, Pogg. Ann. d. Phys. 1883 (3), 18, 663 bis 695.* — **E. E. Kummer,** *Allgemeine Theorie der geradlinigen Strahlensysteme, Crelles Journ. 1860, 57, 189 bis 230 (vgl. auch Berl. Ber. 1860, 469 bis 474).* — **O. Lummer,** *Einiges zur Correction dioptrischer Systeme, Verh. d. Phys Ges., Berlin 1895, 14, 24 bis 31.* — **Derselbe,** *Beiträge zur photographischen Optik, Z. S. f. Instrkde. 1897, 17, 208 bis 219; 225 bis 239; 264 bis 271. Ins Englische übersetzt von S. P. Thompson, Contributions to Photographic Optics by, Otto Lummer, London, Macmillan and Co 1900.* — **E. L. Malus,** *Traité d'optique, Première partie, Des Questions d'optique qui dependent de la géométrie Mém. Sav. Etrang. 1811, 2, 214 bis 302.* — **J. C. Maxwell,** *On the application of Hamiltons characteristic function to the theory of an optical instrument etc., London, Math. Soc. Proc. 1874 bis 1875, 6, 117 bis 122 und 182 bis 190.* — **A. F. Möbius,** *Entwickelung der Lehre von dioptrischen Bildern mit Hilfe der Collineations-Verwandtschaft, Leipziger Berichte 1855, 7, 8 bis 32.* — **J. Petzval,** *Bericht über optische Untersuchungen, Wien. Ber. 1857, 24, 50 bis 76; 92 bis 106, 129 bis 145; 26, 33 bis 90.* — **P. Rudolph** *(und E. Abbe), Anamorphotisches Linsensystem, DRP 99722 v. 30./11. 1897.* — **L. Seidel,** *Zur Dioptrik Astr. Nachr. 1853, 37, 105 bis 120; 1856, 43, 289 bis 304; 305 bis 320; 321 bis 332; Gelehrte Anzeigen d. Bayr. Akad. 1855, Nr. 16 u. 17.* — **Derselbe** *(Aus dem Nachlasse herausgegeben von S. Finsterwalder), Ueber die Bedingungen möglichst präziser Abbildung eines Objektes von endlicher scheinbarer Größe durch einen dioptrischen Apparat, Münch. Akad. Ber., Math. Phys. Cl. 1898, 395 bis 422.* — **K. Strehl,** *Theorie des zweilinsigen Objektivs, Z. S. f. Instrkde. 1901, 21, 10 bis 11.* — **J. C. Sturm,** *Memoire sur l'Optique, Liouvilles Journ. 1838, 3, 357 bis 384.* — **Th. Sutton,** *Distortion produced by lenses, Phot. Notes 1862, 7, Nr. 138, 3 bis 5.* — **M. Thiessen,** *Beiträge zur Dioptrik, Berl. Ber. 1890, 799 bis 813.* — **Derselbe,** *Ueber vollkommene Diopter, Verh. d. Phys. Ges., Berlin 1892, Wied. Ann. 1892 (2), 45, 821 bis 823 und 823 bis 824.* — **Schwarzschild,** *Untersuchungen zur Geom. Optik. Abhdlgn d. Ges. d. Wiss. Göttingen math. phys. Kl. N. F. 4, Nr. 1 und 2 1905.* — **W. Wien und O. Lummer,** *Ueber die Verwirklichung der schwarzen Strahlung, Wied. Ann. 1895, 56, 451 bis 456.*

O. Lummer.

Abegg

Richard.

Geboren am 9. Januar 1869 zu Danzig; gestorben am 4. April 1910 durch Unfall bei einer Ballonfahrt. Er war zuletzt in Breslau Professor der physikalischen Chemie und hat auf diesem Gebiete sich durch vortreffliche Experimentaluntersuchungen vielseitig betätigt, die für die Lehre von den Lösungen, für die Elektrolyse, die Photographie u. a. von Bedeutung waren. Von ihm rührt eine Theorie der Valenz her, die von Originalität der Gedanken Zeugnis gibt. Das von ihm begonnene große Handbuch der anorganischen Chemie konnte er nicht vollenden.

Literatur. *Nekrolog s. Chem. Zeitg. 1910 S. 369.*

E. von Meyer.

Absorption.

Lösungsabsorption.

1. Begriff der Absorption. 2. Messung der Absorption von Gasen durch Flüssigkeiten. 3. Absorption von Gasen in festen Stoffen.

1. Begriff der Absorption. Die Absorption ist ein Spezialfall der Mischungs- oder Löslichkeitserscheinungen (vgl. den Artikel „Lösungen"). Mischung oder Lösung ist der Vorgang der gegenseitigen Aufnahme von mindestens zwei verschiedenen Stoffen im allgemeinen; Absorption heißt er, wenn Gase durch flüssige oder feste Stoffe, oder Flüssigkeiten durch feste Stoffe aufgenommen werden, so daß im ersten Falle das Gas, im zweiten die Flüssigkeit teilweise oder praktisch vollkommen verschwindet.

2. Messung der Absorption von Gasen durch Flüssigkeiten. Besonders gebräuchlich ist die Bezeichnung für die Aufnahme eines Gases durch eine Flüssigkeit. Manche Gase werden von gewissen flüssigen Stoffen sehr stark aufgenommen, z. B. Chlorwasserstoff oder Ammoniak durch Wasser, andere wieder sehr wenig, wie Wasserstoff durch Glycerin, auch sind Temperatur und Druck von großem Einflusse. Die Messungsanordnungen sind für nicht sehr große Absorption nicht ganz einfach und erfordern Beachtung von mancherlei Umständen; im allgemeinen gebraucht man ein Gefäß, das mit einer bekannten Flüssigkeitsmenge teilweise gefüllt ist und darüber etwas Gas enthält, sowie ein damit verbundenes Meßrohr, das die Messung der Mengenabnahme des Gases vorzunehmen erlaubt (Absorptiometer von Bunsen; über neuere Apparate vgl. Ostwald-Luther Hand- und Hülfsbuch). Man muß die beiden Stoffe miteinander schütteln, um die Aufnahme zu beschleunigen, und fährt fort, bis die Gasmenge nicht mehr abnimmt. Die pro Mengeneinheit der Flüssigkeit aufgenommene Menge Gas heißt die Löslichkeit des Gases in dieser Flüssigkeit. Die Menge des Gases mißt man am besten nach Molen (vgl. den Artikel „Molekularlehre"), die der Flüssigkeit, solange die Löslichkeiten nicht sehr groß sind, nach Litern. Man findet für kleine Löslichkeiten häufig ein vor mehr als 100 Jahren von dem Engländer W. Henry aufgefundenes Gesetz bestätigt, demzufolge bei konstanter Temperatur ein reiner gasförmiger Stoff (also nicht etwa ein Gemisch von mehreren Gasen wie Luft) von einer bestimmten Flüssigkeitsmenge proportional dem auf dem Gase ruhenden Drucke absorbiert wird. Bezeichnet man also den Druck mit p, und die aufgenommene, d. h. maximal aufnehmbare Menge mit a, so ist $p : a =$ konstant. Nimmt man ein anderes Flüssigkeitsquantum, so wird auch eine andere Gasmenge aufgenommen, und setzt man demnach statt a die durch die Flüssigkeitsmenge dividierte aufgenommene Gasmenge, d. h. die Konzentration c des gelösten Gases, so wird $p : c =$ konstant. Wenn, wie das bei schwerlöslichen Gasen meist der Fall ist, das Gas sich den Gesetzen des idealen Zustandes (vgl. den Artikel „Gase") fügt, so ist das Produkt von Druck und Volum sowohl für die anfangs vorhanden gewesene, wie für die übriggebliebene Gasmenge konstant (Boyles Gesetz). Für das gelöste Gas würde also, wenn es freies Gas wäre, das gleiche gelten.

Bei Erhöhung des Druckes auf seinen doppelten Wert wird nun die doppelte Menge Gas gelöst. Diese wäre aber im freien Zustande im selben Volum v enthalten gewesen, da ja auch im freien Gase der Druck auf den doppelten Wert gestiegen wäre. Man kann also bei gleichzeitiger Gültigkeit von Henrys und Boyles Gesetz sagen: Das durch Absorption in einer bestimmten Flüssigkeitsmenge unter beliebigem Drucke verschwindende Volum eines Gases ist unabhängig vom Drucke.

Wir messen p in Millimeter Quecksilber (vgl. den Artikel „Druck"), die gelöste Gasmenge in Liter, die sie frei unter p erfüllen würde, die Flüssigkeitsmenge ebenfalls in Litern, so daß ihr Verhältnis λ die Löslichkeit (Löslichkeitskoeffizient) eine reine Zahl wird, die vom Drucke nicht abhängt:

Stickstoff in Wasser bei 25°

p	V flüss.	V Gas	λ
268,9	26,479	0,4149	0,0157
601,6	26,479	0,4095	0,0155
718,5	26,350	0,4115	0,0156
830,0	26,350	0,4147	0,0157

Bei höheren Drucken bleibt λ nicht mehr so konstant.

Stickstoff in Wasser bei 19,4°

p	λ
795	0,01 616
1381	0,01 602
2215	0,01 585
3881	0,01 546
6160	0,01 473

Aber die Veränderlichkeit ist doch nur mäßig groß. Meist ist nur die Löslichkeit für Atmosphärendruck gemessen, also das Henrysche Gesetz nicht geprüft worden. In den folgenden Zahlen sind darum die von 1000 g Wasser gelösten Gramme Gas angegeben, wenn der Druck 760 mm Hg beträgt (Gas + Wasserdampf, dessen Druck aber bei 30° erst 31 mm beträgt. t = Celsiustemperatur).

t	O_2	H_2	N_2	CO	CH_4
0	0,0695	0,00192	0,0293	0,0440	0,0396
10	0,0537	0,00174	0,0230	0,0348	0,0296
20	0,0434	0,01160	0,0189	0,0284	0,0232
30	0,0359	0,00147	0,0161	0,0241	0,0191

t	CO_2	H_2S	SO_2	C_2H_2	NH_3
0	3,35	7,10	228	2,0	987
10	2,32	5,30	162	1,5	689
20	1,69	3,98	113	1,2	535
30	1,26	—	78	0,9	—

Diese Zahlen lassen auch den Temperatureinfluß erkennen (über Löslichkeiten anderer Gase, sowie andere Temperaturen und Lösungsmittel vgl. die Literatur in Landolt-Börnsteins Phys.-Chem. Tabellen).

Vielfach wird auch der Absorptionskoeffizient angegeben, das ist die pro Liter der Flüssigkeit unter 760 mm absorbierte Gasmenge, ausgedrückt in Litern, die sie frei bei 0° und 760 mm einnehmen würde.

Die große Löslichkeit von etwa Ammoniak und Schwefeldioxyd (s. Tabelle) pflegt man als Folge des Auftretens chemischer Reaktionen aufzufassen. Ammoniak ist in Wasser teilweise als Ammoniumhydroxyd NH_4OH enthalten, d. h. als Verbindung von Wasser und Ammoniak, analog Schwefeldioxyd als schweflige Säure H_2SO_3. Was man gemessen hat, ist also eigentlich gar nicht die Löslichkeit von unverändertem NH_3 in unverändertem Wasser. Bei Chlorwasserstoff findet man eine so große Löslichkeit, daß man den Druck des freien Gases über einigermaßen verdünnten Lösungen kaum hat messen können. Hier tritt aber sehr stark die elektrolytische Dissoziation auf (vgl. den Artikel „Elektrochemische Dissoziation"). Sehr deutlich zeigt sich das Hinzutreten, ja völlige Prävalieren einer chemischen Umsetzung bei der Absorption von Kohlendioxyd durch Wasser, das etwas Kali oder Natron enthält. Dann wird bekanntlich aus 2 KOH + CO_2 das Salz K_2CO_3 gebildet, und die rohe Annäherung an das Henrysche Gesetz, die CO_2 in reinem Wasser noch zeigt, verschwindet vollkommen.

Ueberhaupt ändern sich die Verhältnisse, wenn das Lösungsmittel kein reiner Stoff, sondern ein Gemisch ist. In einfachen Fällen gilt dann das Henrysche Gesetz oft, aber die Löslichkeit ist abhängig von der Zusammensetzung des Lösungsmittels, und zwar oft in komplizierter Weise. Salze, die nicht selbst chemisch auf das Gas reagieren, pflegen in wässeriger Lösung die Löslichkeit der Gase zu vermindern (vgl. den Artikel „Lösungen").

Ebenso verschieben sich die gelösten Gasmengen, wenn ein und dasselbe Lösungsmittel nicht ein reines Gas, sondern ein Gasgemenge lösen soll. Wenn keine Komplikation (chemische Umsetzung) auftritt, wird jedes Gas so gelöst, daß zwischen seiner aufgenommenen Menge und dem Partialdrucke (vgl. den Artikel „Lösungen") des freigebliebenen Gases die Henrysche Beziehung besteht. Dadurch ändert sich also die relative Zusammensetzung des Gasrestes. Z. B. verliert Luft über Wasser relativ mehr Sauerstoff als Stickstoff, weil jener löslicher ist.

3. Die Löslichkeit von Gasen in festen Stoffen. Sie ist meist erheblich kleiner als die in Flüssigkeiten. Besonders gut untersucht hat man in neuerer Zeit die Löslichkeit in Metallen. Ferner ist bekannt, daß gewisse feste Kolloide (vgl. den Artikel „Disperse Gebilde") Wasserdampf in reversibler Weise aufnehmen und abgeben, je nach dem Drucke. Unter den Mineralien gehören hierher die Zeolithe. Doch werden mitunter auch solche Erscheinungen als Absorption bezeichnet, die richtiger Adsorption oder Occlusion genannt werden müßten. Adsorption (vgl. den Artikel „Adsorption") ist die Aufnahme von flüssigen, gelösten oder gasförmigen Stoffen an einer Oberfläche, Occlusion oder Inclusion die meist durch zufällige Umstände verursachte Einschließung von Gasen oder Tröpfchen in festen Stoffen, wie sie häufig an Mineralien und künstlichen Kristallen beobachtet wird, und wie sie auch bei der gleichzeitigen elektrolytischen Abscheidung von Metallen (z. B. Kupfer) und etwas Wasserstoff aus einer wässerigen Kupfersalzlösung stattfindet. In anderen Fällen, wie bei den Quellungsphänomenen (Gelatine in Wasser; Kautschuk in Schwefelkohlenstoff oder Aether) besteht noch keine deutliche Scheidung der Bezeichnungen Absorption und Adsorption.

Literatur. ***W. Ostwald,*** *Lehrbuch der allgemeinen Chemie, Leipzig 1891.* — ***W. Nernst,*** *Theoretische Chemie, Stuttgart 1909.* — ***A. Sieverts,*** *Zeitschrift für physikalische Chemie Bd. 60 (1907), S. 163; Bd. 68 (1909), S. 115; Bd. 74 (1910) S. 277.*

K. Drucker.

Absorption.

Lichtabsorption.

1. Einleitung. Im folgenden sollen vornehmlich die Einflüsse der Temperatur, des Aggregatzustandes, des Lösungsmittels usw auf den Absorptionscharakter eines Stoffes und die Beziehungen der Absorption zur chemischen Konstitution besprochen werden. Ueber die Theorie der Absorption vgl. den Artikel „S t r a h l u n g s u m f o r m u n g e n".

Wenn auch die optische Absorption stets Gegenstand der Forschung gewesen ist, sofern diese sich mit dem Problem der Farbigkeit befaßte, so ermöglichte doch erst die Entdeckung der Spektralanalyse durch K i r c h h o f f und B u n s e n (1859) eine methodische Untersuchung. Auch dann hatte das Studium der Absorptionsspektren weit geringere Erfolge, als das der Emissionsspektren. Lange mußte man sich damit begnügen, die Absorptionsspektren der Stoffe zu registrieren, ohne eine Brücke zu ihren chemischen Eigenschaften zu finden. Erst neuerdings sind solche Beziehungen gefunden worden, besonders, seitdem die Absorptionserscheinungen auch im ultravioletten und im ultraroten Spektrum untersucht werden (vgl. die Artikel „F a r b e" und „S p e k t r o s k o p i e").

2. Beschreibung der Absorptionsspektra und Absorptionserscheinungen. 2a) D e f i n i t i o n. Bekanntlich gibt rein weißes Licht bei prismatischer Zerlegung ein kontinuierliches Spektrum, das alle Farben des Regenbogens ohne Unterbrechung enthält. Untersucht man dieses Licht in gleicher Weise, nachdem es einen Stoff von gewisser Schichtdicke durchdrungen hat, so findet man, daß das neue Spektrum nicht mehr die ursprüngliche Vollständigkeit besitzt. Mehr oder minder große Teile in dem früher kontinuierlichen Spektrum fehlen; es ist also Licht von bestimmten Wellenlängen absorbiert worden. Daher nennt man ein solches Spektrum auch A b s o r p t i o n s s p e k t r u m oder R e s t s p e k t r u m. Selten ist die Lichtabsorption eines Spektralgebietes vollständig; meist findet nur eine Schwächung der ursprünglichen Intensität des Lichtes um einen bestimmten Betrag statt.

2b) F a r b i g k e i t. Aus physiologischen Gesetzen (vgl. den Artikel „F a r b e") geht hervor, daß Licht, in welchem ein sichtbarer Spektralbereich fehlt, farbig erscheint, und zwar in der Komplementärfarbe der fehlenden Farbe. Da es nun kaum Stoffe gibt, welche für alle Wellenlängen gleich durchlässig sind, so werden alle Körper mehr oder weniger farbig erscheinen; denn immer werden einige Spektralbereiche stärkere Absorption erfahren als andere. Sind diese Unterschiede beträchtlich, so erscheinen die Stoffe stark farbig. Aus physiologischen Gründen ist auch die Breite des absorbierten Spektralgebietes von Bedeutung für den Eindruck der Farbigkeit. Es gibt Stoffe, z. B. Salze seltener Erden, welche zwar im sichtbaren Spektrum stark absorbieren; aber der fehlende Teil des Spektrums ist zu schmal, als daß eine merkliche Farbigkeit entstehen könnte.

Auch das diffus reflektierte Licht ist teilweise in die Körper eingedrungen und so durch verschiedene Absorption gewisser Spektralbereiche verändert worden.

Die Farbigkeit scheinbar farbloser Stoffe läßt sich leicht zeigen, wenn man die Lichtabsorption durch sehr große Schichtdicken untersucht. Dann erscheint z. B. Wasser blau.

2c) Einteilung der Absorptionsspektren. Eine Einteilung nach allgemeinen Gesichtspunkten bietet große Schwierigkeit; man hat sich vorläufig darauf beschränken müssen, eine rein formale Systematik durchzuführen, der natürlich eine gewisse Willkür anhaftet.

α) Endabsorption. Die Absorption kann an einem Ende des Spektrums stattfinden (einseitiges Absorptionsspektrum), oder es werden beide Enden des Spektrums absorbiert (zweiseitiges Absorptionsspektrum), im letzteren Falle besteht also das Spektrum nur aus Strahlen mittlerer Wellenlänge.

β) Selektive Absorption. Bei der selektiven Absorption fehlen ein oder mehrere Teile innerhalb der Spektra. Ein solcher fehlender Teil heißt auch Absorptionsband. Oft ist das Spektrum durch mehrere Banden unterbrochen: Bandenspektrum. Wenn ein Band sehr schmal und scharfbegrenzt ist, daß es in eine Linie übergeht, spricht man von Linienspektrum.

γ) Allgemeine Absorption. Häufig findet man für die Endabsorption, besonders am kurzwelligen Ende des Spektrums, die Bezeichnung allgemeine Absorption. Hiermit soll besonders der Fall zum Ausdruck gebracht werden, daß die Absorptionsgrenze nicht scharf ist, sondern die Schwächung sehr allmählich erfolgt. Eine schwache allgemeine Absorption kann sich über große Teile des Spektrums erstrecken, ohne leicht wahrgenommen zu werden, weil das Licht oft nur um einen kleinen Betrag geschwächt ist. So ist es möglich, daß außerdem noch Absorptionsbanden im Bereiche allgemeiner Absorption liegen, daß sich also gewissermaßen zwei Absorptionsgebiete übereinanderlagern.

δ) Absorptionsgrenzen. Eine besondere Beachtung verdienen die Absorptionsgrenzen. Diese Grenzen sind selten scharf, sondern mehr oder minder verwaschen. Die Dunkelheit eines Bandes nimmt auf der einen Seite allmählich zu, dann erreicht sie ein Maximum, und nimmt auf der anderen Seite wieder ab.

ε) Symmetrische und unsymmetrische Absorptionsbanden. Je nach der Art der Absorptionsgrenzen unterscheidet man zwischen symmetrischen und unsymmetrischen Absorptionsbanden. Bei jenen liegt das Maximum der Dunkelheit in der Mitte zwischen den Absorptionsgrenzen, und die Abnahme der Dunkelheit erfolgt zu beiden Seiten des Maximums in gleicher Weise. Bei unsymmetrischen Banden ist eine Absorptionsgrenze viel schärfer als die andere. Je nach der Lage des Maximums der Dunkelheit bezeichnet man solche Banden auch als nach Rot oder nach Violett „abschattiert".

2d) Graphische Darstellung der Absorptionsspektra nach Bunsen. Der Verlauf der Dunkelheit in einer Bande wird besser graphisch dargestellt als beschrieben. Wenn man die Intensität der Absorption als Ordinate, und die entsprechende Wellenlänge als Abszisse aufträgt, so bekommt man eine Absorptionskurve, wie sie von Bunsen eingeführt ist. In folgendem Schema sind die wichtigeren Formen der Absorption bezeichnet.

rot 1 2 3 4 5 6 7 violett

Fig. 1.

1 Starke Absorptionslinie; 2 Schwache Absorptionslinie; 3 Schmales scharfbegrenztes Band von starker Absorption (symmetrisch); 4 Schmales scharfbegrenztes Band von schwacher Absorption (symmetrisch); 5 Schmales unsymmetrisches Band nach Rot abschattiert; 6 Breites unsymmetrisches Band nach Rot scharf begrenzt nach Violett abschattiert; 7 Allgemeine Endabsorption im Violett.

Während die Bunsenschen Absorptionskurven zwar die Absorptionsgrenzen mit genügender Genauigkeit erkennen lassen, geben sie die Stärke der Absorption, das sogenannte Extinktionsvermögen d. h. das Verhältnis des absorbierten Lichtes zu dem überhaupt eindringenden Licht meist nur unvollkommen wieder. Die Höhe der Kurven, welche das Extinktionsvermögen darstellen soll, wurde von den meisten Autoren ganz subjektiv gezeichnet. Wesentlich vollkommenere Kurven gewinnt man nach der Methode von Hartley-Baly (s. Abschnitt 4 „Meßmethoden").

2e) Absorptionsspektren von Mischungen verschieden absorbierender Stoffe. Während schon einheitliche Stoffe sehr komplizierte Absorptionsspektra haben können (die vielfach geäußerte Ansicht, daß einem einheitlichen Stoffe höchstens 3 Absorptionsbänder zukämen, ist ganz irrig), so wächst natürlich die Komplikation, wenn, z. B. in Lösungen, Mischungen verschieden absorbierender Stoffe vorliegen. Hier gilt allgemein die Regel, daß solche Absorptionsspektra sich additiv aus den Absorptionsspektren der einzelnen Bestandteile zusammensetzen. Durch solche Addition kann das neue Spektrum scheinbar ein von den Einzelspektren ganz verschiedenes Aussehen erhalten, besonders dann, wenn sich die Absorptionsgebiete teilweise überdecken. Beachtenswert ist der Fall, wenn sich eine schwache allgemeine Absorption über eine selektive Absorption

lagert. Hierdurch wird das Maximum der Absorption scheinbar verschoben; ein symmetrisches Band erscheint unsymmetrisch und die Abschattierung erscheint bisweilen in entgegengesetzter Richtung zu verlaufen. Besonders im Ultraviolett sind solche Täuschungen möglich, da hier sehr mannigfache Umstände eine allgemeine Absorption veranlassen können.

Eine einfache Addition der Spektren mehrerer Stoffe ist natürlich nur dann zu erwarten, wenn diese Stoffe nicht miteinander reagieren und auch nicht in feinerer Weise, z. B. durch Aenderung des Solvatationszustandes, eine gegenseitige Beeinflussung ausüben. Zwar wurde früher vermutet, daß sich die intramolekularen und intraatomistischen Schwingungen, auf denen der Absorptionsmechanismus beruht, bei mehreren Molekülarten gegenseitig beeinflussen könnten (sogenannter Meldeeffekt); aber diese Annahme wurde nie exakt bewiesen und ihre Richtigkeit erscheint ausgeschlossen. Im Gegenteil deuten Abweichungen vom additiven Verhalten auf physikalische oder chemische Vorgänge hin. In vielen Fällen ist eine experimentelle Entscheidung, ob solche Abweichungen vorliegen, leicht zu erbringen. Man bestimmt einmal das Absorptionsspektrum, indem man die betreffenden Stoffe einzeln löst, und das Licht durch die hintereinander gestellten Lösungen schickt. Dann untersucht man das Absorptionsspektrum der gemischten Lösungen, und vergleicht beide Spektra auf Identität. Diese Differenzmethode (Byk; Schaefer) ist noch wenig angewandt worden und dürfte häufig wertvolle Aufschlüsse geben können.

3. Absorption in den verschiedenen Spektralbereichen. Die späte Entwickelung der Absorptionsspektroskopie ist in erster Linie auf den Umstand zurückzuführen, daß die Arbeiten auf das sichtbare Spektrum beschränkt blieben. Diese Begrenztheit der Untersuchungen schloß ein systematisches Vorgehen aus, da das sichtbare Spektrum etwa nur $^1/_{10}$ des bisher nachgewiesenen Spektralbereichs ausmacht. Nachdem die Schwierigkeiten der Absorptionsmessungen in den extremen Spektralregionen (Ultraviolett Ultrarot Gebiet elektrischer Wellen) überwunden waren, fand man, daß auch die farblosen Stoffe meist im Ultraviolett und immer im Ultrarot sehr ausgeprägte Absorptionen ausüben, so daß der allgemeine Satz aufgestellt werden kann, daß jedem Stoffe ein bestimmtes, nur für ihn charakteristisches Absorptionsspektrum zukommt. Erst durch diese Erweiterung der Untersuchung ist es möglich geworden, die Beziehungen zwischen den Absorptionsspektren und chemischen Fragen erfolgreich in Angriff zu nehmen. Früher lagen die Verhältnisse insofern besonders ungünstig, als fast alle Stoffe von einfachem chemischem Bau farblos sind, d. h. nicht im sichtbaren Spektrum absorbieren, während z. B. die meisten Farbstoffe zwar prägnante Absorptionsspektren haben, aber eine sehr komplizierte und teilweise nicht genügend erforschte chemische Konstitution besitzen.

Den größten Erfolg hat in der letzten Zeit die Ultraviolettspektroskopie aufzuweisen. Von hier scheint der Weg auszugehen, der zu einer aussichtsreichen Erforschung der Beziehungen zwischen Absorptionsspektrum und der chemischen Konstitution führt. Die Ultrarotspektroskopie ist wegen der viel schwierigeren experimentellen Technik noch nicht so weit fortgeschritten, doch lassen schon die vorliegenden Resultate noch sehr wichtige Erkenntnisse erwarten. Die Messungen der Absorption elektrischer Wellen haben bisher nur wenige Einzelergebnisse gehabt.

3a) Absorption im sichtbaren Spektrum. Da die im Abschnitt 7 erwähnten Arbeiten und Theorieen im wesentlichen nur auf den sichtbaren Spektralbereich Bezug haben, kann hier von einer Uebersicht abgesehen werden.

3b) Absorption im Ultraviolett. Da das Auge nur kurzwelliges Licht bis etwa zur Wellenlänge 395 $\mu\mu$ wahrnimmt (die Grenze der Wahrnehmbarkeit ist subjektiv sehr verschieden und endet vielfach früher), so benutzt man die Empfindlichkeit des Bromsilbers photographischer Platten für die Ultraviolettspektroskopie. Unterhalb der Wellenlänge 230 $\mu\mu$ stört die Absorption der Gelatine; dann müssen bindemittelfreie Platten verwendet werden (Schumann). Zwar ist auch das Bolometer erfolgreich im Ultraviolett angewandt worden (Pflüger); meist ist aber hierfür die Energie im ultravioletten Spektrum zu gering, so daß man sich jetzt fast ausschließlich der einfachen photographischen Methoden bedient.

Die ersten Arbeiten in dieser Richtung stammen von A. Miller (1862). W. N. Hartley begann 1879 seine wertvollen Untersuchungen; ihm ist die Bereicherung der chemischen Methoden um die Ultraviolettspektroskopie zu danken, besonders durch Verbesserung der experimentellen Technik. Hartley fand, daß die meisten organischen Verbindungen, sofern sie ungesättigte Gruppen enthalten, in Ultraviolett charakteristisch absorbieren. Viele Verbindungen, z. B. Benzol, Naphtalin, Pyridin, Chinolin und ihre Derivate haben sehr interessante Absorptionsspektren. Gesättigte Verbindungen, wie Wasser, Alkohol, Aether, Hexan, sind wiederum für Ultraviolett weitgehend durchlässig, so daß für die Untersuchungen auch eine größere Anzahl geeigneter Lösungsmittel zur Verfügung steht. Die meisten

Arbeiten Hartleys sind in den Büchern von Kayser und von Ley zusammengestellt. Einige Untersuchungen, die zu allgemeineren theoretischen Spekulationen geführt haben, sind im Abschnitt 6a angeführt.

Baly vereinfachte noch die Methode Hartleys. Seine Arbeiten über die Ketone, die Benzolderivate, Nitroverbindungen usw. veranlaßten ihn zu seiner Theorie der Isorrhopesis. Wenn auch diese Theorie später wesentlich eingeschränkt werden mußte, so hat sie doch der Ultraviolettspektroskopie den Impuls zu ihrer schnellen Entwickelung in den letzten Jahren gegeben. Mit der Methodik Balys haben später Hantzsch und seine Schüler zahlreiche Beiträge zur Ultraviolettspektroskopie geliefert. Aus den bisherigen Resultaten geht jedenfalls hervor, daß alle Absorptionsmessungen auf das kurzwellige Spektrum ausgedehnt werden sollten, zumal jetzt Spektrographen gebaut werden, welche gleichzeitige Aufnahme des Spektrums vom Rot bis zum Ultraviolett auf einer Platte ermöglichen (s. Abschnitt 4b).

Unterhalb der Wellenlänge 220 $\mu\mu$ wachsen die technischen Schwierigkeiten der Ultraviolettspektroskopie ganz bedeutend, und Absorptionsmessungen etwa im Bereiche Schumannscher Wellen stehen noch aus; voraussichtlich können hier noch wichtige Resultate gewonnen werden.

3c) Absorption im Ultrarot. Während die Absorptionsmessungen im sichtbaren und ultravioletten Spektrum so sehr vereinfacht worden sind, daß sie auch im chemischen Laboratorium allgemein benutzt werden können, bietet die Ultrarotspektroskopie noch solche Schwierigkeiten, daß sich nur wenige Forscher in dieser Richtung betätigt haben.

Eine geringe Bedeutung haben photographische Methoden, wenn auch verwickelte Verfahren bekannt sind, um Platten bis zu einem gewissen Grade ultrarotempfindlich zu machen (Abney; Burbank).

Auch die Auslöschung der Phosphoreszenz durch ultrarote Strahlen ist benutzt worden, um ultrarote Absorptionsspektra anschaulich zu machen.

Für genauere Arbeiten sind aber Messungen mit dem Bolometer, der Thermosäule oder dergl. erforderlich (vgl. den Artikel „Ultrarot").

Die zahlreichsten Arbeiten verdanken wir Coblentz. Er stellte fest, daß auch die einfachsten Verbindungen, wie Wasser, Alkohol, Aether, Aceton, sehr komplizierte Ultrarotspektren haben; diese scheinen oft unabhängig vom Aggregatzustand zu sein (Eis, Wasser, Wasserdampf). Ferner fand Coblentz für die Methyl-, Amido-, Nitro- und Hydroxylgruppen typische Absorptionsbänder. Auch für die Stellungsisomeren (z. B. die Xylole) bestehen Gesetzmäßigkeiten im Bau der Absorptionsbanden.

Nach den bisherigen Resultaten scheinen prinzipielle Unterschiede zwischen den ultravioletten und ultraroten Banden zu bestehen. Im Ultraviolett dürften vorwiegend intramolekulare, eventuell intraatomistische Schwingungen, die durch ungesättigte Gruppen veranlaßt oder beeinflußt werden, die Ursache der Absorption sein, während im Ultrarot auch gesättigte Gruppen, z. B. Methylgruppen, durch Banden registriert werden. Wenn es auch noch verfrüht erscheint, dies als allgemeine Gesetzmäßigkeit aufzustellen, so besteht doch die begründete Hoffnung, daß die Ultrarotspektroskopie einmal die größte Bedeutung für die chemische Konstitutionsforschung gewinnen wird (Näheres in der Monographie von Coblentz im Jahrbuch für Radioaktivität und Elektronik 4 7 1907).

3d) Absorption elektrischer Wellen. Der Nachweis ultraroter Wellen gelingt nur bis etwa zur Wellenlänge $\lambda = 0{,}06$ mm. Dann befindet sich zwischen $\lambda = 0{,}06$ bis $\lambda = 3$ mm ein unbekanntes Gebiet, worauf die elektrischen Wellen folgen. Nur sehr wenige Messungen, die von chemischen Gesichtspunkten ausgehen, liegen hier vor. So fand Drude ein Absorptionsband, das er der Hydroxylgruppe zuschreibt, weil es bei allen untersuchten Hydroxylverbindungen vorkommt.

4. Meßmethoden. Während auf die Beschreibung der Spektralapparate (Spektroskope Spektrographen Spektralphotometer) in den Artikeln „Spektroskopie" und „Optische Instrumente" verwiesen werden muß, sollen die Meßmethoden kurz skizziert werden, wobei vorwiegend die vereinfachte Methodik, wie sie für chemische Laboratorien usw geeignet ist, berücksichtigt wird; ausführlichere Angaben bringen u. a. die Werke von Kayser, Baly, Ley.

4a) Messungen im sichtbaren Spektralbereich. Lichtquellen. Erforderlich ist eine Lichtquelle, welche ein gleichmäßiges und kontinuierliches Spektrum gibt. Die vielfach benutzten Auerstrümpfe sind wegen ihrer Armut an langwelligen Strahlen weniger geeignet als die Nernststifte. Bogenlicht ist wegen seiner Intensitätsschwankungen und einer gewissen Diskontinuität seines Spektrums nur beschränkt verwendbar.

Untersuchung fester Körper. Meist ist die Herstellung sehr geringer Schichtdicken nötig; von Kristallen werden planparallele Dünnschliffe angefertigt. Prismatische Schliffe sind für Messungen bei variablen Schichtdicken brauchbar; dann

wird der Keil mit einem Mikrometerschlitten unmittelbar vor dem Spalt des Spektroskops verschoben.

Bei einigen Stoffen, die kein zu großes Reflexionsvermögen besitzen, dagegen stark selektiv absorbieren, kann auch das reflektierte Licht untersucht werden (Reflexionsspektrum). Zweckmäßig wird dann die feingepulverte Substanz zwischen zwei ineinandergeschobene Reagenzröhren gebracht und durch einen intensiven seitlichen Lichtkegel beleuchtet. Für Untersuchungen des Temperatureinflusses kann man leicht das innere Reagenzrohr mit Kältemischung anfüllen oder elektrisch heizen.

Untersuchung von Lösungen, Gasen und Dämpfen. Vielfach dienen zur Aufnahme von Lösungen planparallele Kuvetten. Besser sind sogenannte Balygefäße mit leicht veränderlichen Schichtdicken. Stark absorbierende Lösungen, die in sehr geringen Schichtdicken untersucht werden müssen, erfordern Absorptionsgefäße, deren Weite durch eine Mikrometerschraube verändert werden kann. Für erwärmte und stark abgekühlte Lösungen sind ebenfalls besondere Absorptionsgefäße konstruiert worden. Apparate zur Untersuchung homogener Dämpfe bei veränderlichen Schichtdicken, Temperaturen und Drucken siehe Schaefer Z. f. wiss. Photogr. Bd. VIII S. 212. Bei Arbeiten mit Dämpfen ist besonders darauf zu achten, daß die Bildung von Nebeln und die Kondensation an den Fenstern der Apparate vermieden wird.

α) Messung der Absorptionsgrenzen. Bei Spektroskopen bietet die Bestimmung der Absorptionsgrenzen um so größere Schwierigkeiten, je verwaschener die Banden sind. Meist ist es ratsamer, mit Spektroskopen von geringerer Dispersion zu arbeiten; die Ablesung ist dann erfahrungsgemäß genauer; außerdem können bei Spektroskopen mit großer Dispersion schwache Banden leicht übersehen werden. Die Spektroskope müssen meist mit Hilfe bekannter Emissionsspektren geeicht werden; besonders geeignet hierzu ist das Heliumspektrum.

Photographische Spektra werden mit Hilfe eines bekannten Vergleichsspektrums ausgemessen; hierzu ist für genaue Messungen ein Mikroskop geeignet, das auf einen Mikrometerschlitten montiert ist. Sehr brauchbar ist der Komparator von Zeiß. Für angenäherte Messungen genügt oft eine sogenannte Standardplatte, auf der zahlreiche Wellenlängen verzeichnet sind und die mit dem auszumessenden Spektrum zur Deckung gebracht wird. Die meisten praktischen Angaben enthält Baly Spektroskopie. Wenn eine Lichtquelle mit kontinuierlichem Spektrum benutzt worden ist, so ist auch auf Platten die Ablesung einer Absorptionsgrenze schwierig. Hier ist es nach einem Vorschlage Balys ratsam, eine Interferenzplatte in den Strahlengang einzuschalten. Dann ist das Spektrum von feinen Linien durchzogen; die Absorptionsgrenze wird bei der Linie angenommen, welche eben den Schwellenwert der Platte überschritten hat.

β) Messung des Extinktionsvermögens. Photometrie. In vielen Fällen begnügt man sich bei der Beschreibung eines Absorptionsspektrums mit der Angabe der Absorptionsgrenzen. Für eine genaue Bestimmung wäre auch die Angabe der Größe der Absorption, des sogenannten Extinktionsvermögens nötig, und zwar für jede Wellenlänge. Da dies praktisch undurchführbar ist, begnügt man sich mit einigen Extinktionsmessungen an charakteristischen Stellen der Spektra. Vielfach wird die Extinktion verschieden definiert; hier soll die Schaumsche Definition angenommen werden. Wenn Licht bestimmter Wellenlänge von der Energie 1 auf einen absorbierenden Körper fällt, so ist zu unterscheiden: 1. der Anteil an reflektiertem Licht R; 2. der Anteil an absorbiertem Licht A; 3. das durchgelassene Licht D. Es ist also

$$R + A + D = 1$$

wo R als Reflexionsvermögen, A als Absorptionsvermögen, D als Durchlassungsvermögen bezeichnet wird. In der Gleichung

$$\frac{A}{1-R} + \frac{D}{1-R} = 1$$

bezeichnet Schaum die Größe $\frac{A}{1-R}$, d. h. das Verhältnis der absorbierten zu der überhaupt eindringenden Energie, mit Extinktionsvermögen.

Die Schwächung des Lichts in einem homogenen absorbierenden Stoff erfolgt nach dem Lambertschen Gesetz (1760).

Die Schwächung des Lichts pro Schichtelement ist proportional der in das Schichtelement eintretenden Lichtmenge, d. h. es ist

$$-dJ = KJ\,dx$$

K ist der Extinktionskoeffizient. Wenn die einfallende Lichtintensität (für $x = o$) mit J_0 bezeichnet wird, und nach Durchdringung der Schicht $x = d$ auf J gesunken ist, so ergibt sich

$$\frac{J}{J_0} = e^{-Kd}$$

K variiert natürlich bei demselben Stoff mit der Wellenlänge.

Für Lösungen eines absorbierenden Stoffes in einem durchlässigen Lösungsmittel hat Beer das Gesetz aufgestellt, daß die Schwächung des Lichts außer der Lichtstärke J noch der Konzentration c proportional sei

$$-dJ = K.J.c\,dx \quad \text{oder} \quad \frac{J}{J_0} = e^{-K.c.d}$$

Für 2 Lösungen von der Konzentration c_1 und c_2 würde also die Absorption gleich sein, wenn die Schichtdicken d_1 und d_2 den Konzentrationen umgekehrt proportional wären, also

$c_1 : c_2 = d_1 : d$ (Beer sches Gesetz).

Dieses Gesetz wird anschaulich, wenn man sich jedes Molekül des gelösten Stoffes mit demselben Extinktionsvermögen versehen vorstellt. Bei Lösungen verschiedener Konzentration wird ein Lichtstrahl dann offenbar dieselbe Schwächung erfahren, wenn er dieselbe Molekülzahl durchdrungen hat.

Dieselben Betrachtungen wie für Lösungen gelten natürlich auch für Gase.

An Stelle von K benutzt man bei Berechnungen gewöhnlich den von Bunsen und Roscoe definierten dekadischen Extinktionskoeffizienten $k = K \log e$. k bedeutet den reziproken Wert derjenigen Schichtdicke, welche eine Substanz haben muß, um das durchfallende Licht durch Extinktion bis auf $^1/_{10}$ der Intensität des einfallenden Lichtes abzuschwächen. Bei Lösungen ist noch die Konzentration zu berücksichtigen. Bedeutet c die Anzahl Moleküle pro Liter, so bezeichnet man $\frac{k}{c}$ als Molekularextinktion.

Bei Extinktionsmessungen ist eine vorherige Orientierung darüber notwendig, an welchen Stellen der Absorptionskurven gemessen wird. Will man kleine Verschiebungen von Banden feststellen (Fig. 2), so wird man natürlich an der Grenze der Bande

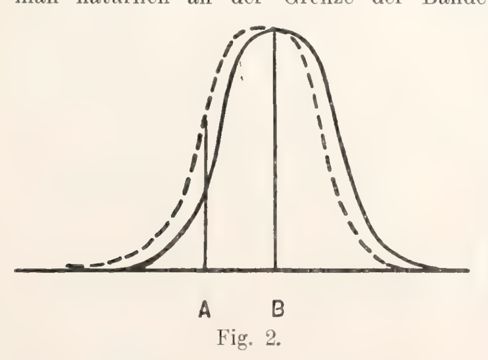


Fig. 2.

die Extinktion feststellen (bei A). Durch Messung im Maximum der Absorption (bei B) würde eine geringe Verschiebung nicht erkannt werden.

Am gebräuchlichsten sind die Spektralphotometer von Vierordt, Glan, Hüfner, König, Martens-Grünbaum (vgl. die Artikel „Optische Instrumente" und „Spektroskopie"). Da der Lichtverlust in diesen Photometern beträchtlich ist, so wird man auf intensive Lichtquellen bedacht sein. Meist ist es erforderlich, Lichtquellen mit selektiver Emission zu verwenden. Die hat erstens den Vorteil, daß mit monochromatischem Licht gearbeitet wird. Lichtquellen mit kontinuierlichem Spektrum geben immer verschiedenfarbige Vergleichsfelder, wodurch die Genauigkeit der Messungen sehr verringert wird. Ferner spart man so eine umständliche Eichung des Photometers, da auf eine bekannte Spektrallinie eingestellt werden kann. Sehr vorteilhafte Lichtquellen sind die Quecksilberdampflampen; größeren Linienreichtum haben die Quecksilberamalgamlampen.

Kolorimetrie. Wesentlich einfacher als die Spektralphotometrie ist die Kolorimetrie. Diese benutzt gemischtes Licht, und dadurch ist ihre begrenzte Anwendbarkeit und geringere Empfindlichkeit bedingt. Unter anderem hängt die Empfindlichkeit von der Breite der Absorptionsbanden ab; ferner können Mischfarben auftreten, für welche das Auge sehr unempfindlich ist. Diese Mängel können wesentlich verringert werden, wenn durch vorgeschaltete Lichtfilter teilweise homogenes Licht hergestellt wird, das dem Absorptionsgebiet des untersuchten Stoffes entspricht (Martens). Die Meßmethode ist sehr einfach: die meisten Apparate sind so eingerichtet, daß das Licht senkrecht durch die Böden von zwei nebeneinanderstehenden Zylindern einfällt. Ein Zylinder enthält eine Vergleichslösung von bekanntem Gehalt. Bei dem anderen Zylinder, welcher die Lösung von unbekannter Konzentration enthält, kann die Schichtdicke verändert werden, entweder durch Tauchzylinder (Duboscq) oder durch verschieden hohe Füllung (Wolff; Krüss). Geeignete Vorrichtungen (z. B. ein Fresnelsches Prismenpaar, ein Lummer-Brodhunscher Würfel Krüss), ermöglichen einen Vergleich der austretenden Lichtbündel auf Gleichheit der Farbe und Intensität. Aus den Flüssigkeitshöhen in beiden Zylindern ergibt sich unmittelbar das Verhältnis der beiden Konzentrationen. Trotz ihrer theoretischen Mängel gestattet die Kolorimetrie häufig Messungen von großer Genauigkeit.

γ) Absorptionskurven nach Hartley und Baly. Diese Kurven geben auch das Extinktionsvermögen der Stoffe in den verschiedenen Spektralgebieten sehr gut wieder. Ein Beispiel möge die Methode erläutern. Zuerst werden die Absorptionsspektren einer sehr konzentrierten Lösung bei zahlreichen Schichtdicken photographiert etwa zwischen 40 bis 4 mm. Nach der letzten Aufnahme bei 4 mm wird die Lösung auf $^1/_{10}$ der ursprünglichen Konzentration verdünnt, und dann in derselben Weise verfahren. Die dezimalen Verdünnungen werden so lange fortgesetzt, bis kein Licht mehr absorbiert wird und das vollständige Spektrum der Lichtquelle auf der Platte erscheint. Bei stark

absorbierenden Stoffen sind oft Verdünnungen auf $n/_{100000}$ nötig. Eine solche Platte würde etwa wie Figur 3 aussehen können; die einzelnen Spektren sind durch Striche schematisiert.

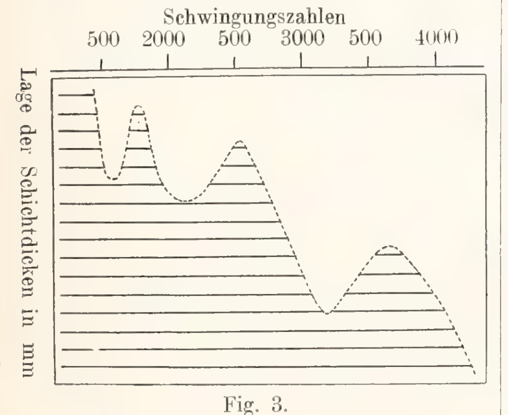


Fig. 3.

Hierauf werden die Absorptionsgrenzen bei jedem dieser Spektren ermittelt (siehe Abschnitt 4 a α). Wenn dann in ein Koordinatensystem die Schichtdicken in mm als Ordinaten, die Wellenlängen der Absorptionsgrenzen als Abszissen eingetragen werden, so resultiert eine sehr anschauliche Absorptionskurve. Die dezimalen Verdünnungen werden als entsprechende Aenderung der Schichtdicke angesehen, unter der Voraussetzung, daß 4 mm einer $\frac{n}{1}$ Lösung ebenso absorbieren wie 40 mm einer $\frac{n}{10}$ Lösung, was ja bei Gültigkeit des Beerschen Gesetzes zutrifft. Abweichungen vom Beerschen Gesetz kommen als Knicke in den Absorptionskurven zum Ausdruck.

Nach Balys Vorschlag werden neuerdings nicht mehr die Schichtdicken in mm als Ordinaten eingetragen, sondern die Logarithmen der Schichtdicken. Ferner bezeichnet man die Absorptionsgrenzen nicht mehr nach Wellenlängen, sondern nach Schwingungszahlen oder reziproken Ångströmeinheiten. Solche Kurven sind bequemer, weil sie die relativen Aenderungen der Absorption anschaulicher wiedergeben und die Absorptionsverhältnisse im Ultraviolett deutlicher hervortreten lassen. Natürlich sind die älteren Kurven z. B. von Hartley leicht in dieser Weise umzuzeichnen. Hierbei soll auch erwähnt werden, daß Hartley früher vielfach nur eine Schichtdicke benutzt hat; dann mußte er für jede Aufnahme die Konzentration variieren. Dieses Verfahren ist offenbar viel umständlicher als das von Baly.

Man kann die Methode von Hartley-Baly auch als eine photometrische Methode bezeichnen, bei der gewissermaßen mittels des Schwellenwertes der Platte photometriert wird. Hiermit sind auch die Mängel der Kurven angedeutet: denn die Kurven enthalten 1. den Schwellenwert der photographischen Platte, der überdies mit jeder Spektralregion variiert; 2. die besondere Energieverteilung im Spektrum der benutzten Lichtquelle. Deshalb eignen sich die Kurven vorwiegend zu Vergleichen, woraus sich wieder die Forderung gleicher Arbeitsbedingungen ergibt (Plattensorte, Belichtungszeit, Entwickelung).

4b) Messungen im Ultraviolett. Im Prinzip werden diese Messungen in gleicher Weise ausgeführt wie im sichtbaren Spektrum. Nur ist man ausschließlich auf photographische Verfahren angewiesen. Natürlich ist zu beachten, daß die ultravioletten Strahlen durch keinen Teil des Apparates absorbiert werden dürfen (Quarzoptik des Spektrographen, Quarzfenster der Absorptionsgefäße).

Lichtquellen. Eine intensive Lichtquelle mit kontiniuerlichem ultraviolettem Spektrum ist nicht bekannt; daher ist man auf leuchtende Dämpfe solcher Metalle angewiesen, die ein sehr linienreiches Ultraviolettspektrum geben. Dann sind die Absorptionsgebiete an dem Fehlen von Linien kenntlich. Benutzt werden Funkenstrecken zwischen Metallspitzen aus Eders Legierung (Cadmium-Zinn und Cadmium-Blei), ferner zwischen Eisen und Nickel. Wegen seiner Lichtstärke ist meist der elektrische Bogen zwischen Elektroden aus weichem Eisen vorzuziehen (Baly). Dicke der Elektroden 0,5 bis 1,0 cm, Stromstärke etwa 5 Ampère bei 40 Volt. Die Erkennung sehr schmaler Absorptionsbanden ist bei diesen Lichtquellen unmöglich; man verwendet dann eine Funkenstrecke zwischen Aluminiumelektroden unter Wasser. Dieses Spektrum hat einen kontinuierlichen Untergrund, ist aber sehr lichtschwach (Konen).

5. Veränderlichkeit der Absorptionsspektren. Während man früher annahm, daß das Absorptionsspektrum eines Stoffes unveränderlich sei, und daß man nur nötig habe, einmal sein Spektrum festzustellen, um ihn unter allen Umständen wiedererkennen zu können, ergaben genauere Messungen, daß diese Ansicht in dieser allgemeinen Fassung falsch ist. Zwar zeigen manche Stoffe charakteristische Absorptionsspektren, die unter den verschiedensten Versuchsbedingungen erhalten bleiben; anderenfalls wäre ja überhaupt keine Absorptionsspektrumsanalyse möglich gewesen. Oft sind aber auch Absorptionsspektren so unbeständig, daß ihre Identifizierung sehr schwierig ist. Die Veränderlichkeit der Spektren, vorwiegend der Lösungsspektren, hat zu Theorien geführt, die teilweise in schroffem Gegensatz zu inander

stehen. Einmal werden, in Anlehnung an die Veränderlichkeit der Emissionsspektren, Ursachen vorwiegend physikalischer Natur behauptet. Im Gegensatz hierzu stehen die chemischen Theorien, welche jede Inkonstanz der Absorptionsspektren auf eine chemische Veränderung des absorbierenden Stoffs zurückführen wollen (H a n t z s c h). Im Hinblick auf das so komplizierte System, wie es eine Lösung darstellt, ist eine scharfe Unterscheidung zwischen physikalischen und chemischen Ursachen natürlich sehr schwer.

Die Veränderlichkeit eines Absorptionsspektrums kann sehr mannigfaltiger Art sein: Absorptionsgrenzen werden verschoben; Banden verschwinden; neue Banden erscheinen; mehrere Banden fließen zusammen; breite Banden lösen sich in mehrere schmale Banden auf: Ferner ändert sich oft das Extinktionsvermögen. Allgemeine Gesetzmäßigkeiten für diese Veränderlichkeiten konnten noch nicht gefunden werden; begrenzte Regelmäßigkeiten werden in den folgenden Abschnitten besprochen. Für die Beurteilung der Veränderlichkeit der Absorption spielt die Prüfung der Gültigkeit des B e e r schen Gesetzes eine wichtige Rolle; hierbei ist aber immer zu berücksichtigen, daß das B e e r sche Gesetz für einige Spektralgebiete gelten kann, für andere nicht.

Je nach der physikalischen oder chemischen Begründung der Inkonstanz der Absorptionsspektren werden natürlich auch die Abweichungen vom B e e r schen Gesetz mehr physikalisch oder chemisch gedeutet. Es läßt sich aber wohl annehmen, daß Abweichungen vom B e e r schen Gesetz auf Veränderungen der absorbierenden Moleküle zurückzuführen sind. Eine Umkehrung dieses Satzes ist unzulässig.

Veränderungen der absorbierenden Moleküle k ö n n e n sich zwar in oft beträchtlicher Aenderung des Absorptionsspektrums äußern, scheinen aber wieder in anderen Fällen ohne jeden Einfluß zu sein, wenigstens in den untersuchten Spektralbereichen.

5a) V e r ä n d e r l i c h k e i t d e r A b s o r p t i o n s s p e k t r e n b e i G a s e n. Da jene Schwingungen, durch welche die Lichtabsorption bewirkt wird, bei Gasen vermutlich am freiesten erfolgen können, so ist a priori zu erwarten, daß die Absorptionsspektren von Gasen und Dämpfen besonders empfindlich gegen Einflüsse des Drucks und der Temperatur sein werden. Die exakte Gültigkeit des B e e r schen Gesetzes ist daher noch bei keinem Gase festgestellt worden. Eine Vergrößerung der Dichte ändert die Absorptionsspektren anders wie eine entsprechende Vergrößerung der Schichtdicke. Mit steigendem Druck tritt eine Verbreiterung der Banden und Linien ein. Auch das Extinktionsvermögen wächst schneller als nach dem B e e r schen Gesetz. Dies wird so erklärt, daß die Absorptionsbanden vielleicht aus feinen Absorptionslinien aufgebaut sind, aus deren Verbreiterung die stärkere Zunahme des Extinktionsvermögens folgen würde. Besonders interessant ist das Absorptionsspektrum des Sauerstoffs bei höheren Drukken. J a n s s e n fand, daß dann außer den bekannten Absorptionsbanden (A B α) noch neue Banden sichtbar werden. Innerhalb der Banden A B α war das B e e r sche Gesetz annähernd gültig; in den neuen Banden fand aber eine Zunahme des Extinktionsvermögens proportional dem Q u a d r a t der Dichte statt. Diese quadratische Zunahme scheint sogar bis zur Verflüssigung des Sauerstoffs zu gelten. Hier fand O l s z e w s k i die neuen Banden in der entsprechenden Stärke bei den berechneten Schichtdicken. Ob das Auftreten der neuen Banden dadurch zu erklären ist, daß bei höheren Drucken außerden O_2Molekülen noch höhere Aggregate auftreten, denen, wie K a y s e r annimmt, die neuen Absorptionsbanden zukommen, ist noch unentschieden. Die Untersuchungen über die Ultrarotabsorption des Kohlendioxyds haben deshalb ein besonderes Interesse gefunden, weil A r r h e n i u s eine neue Theorie der Eiszeit aufgestellt hatte, die er mit der Absorption der Wärmestrahlen durch das Kohlendioxyd der Atmosphäre in Beziehungen bringt. Auch bei diesen Messungen wurde festgestellt, daß die Absorption großer Schichten nicht mit derjenigen kleiner Schichten bei entsprechend höherem Druck identisch ist. Schließlich soll noch das ultraviolette Absorptionsspektrum der Benzoldämpfe erwähnt werden als Beispiel dafür, daß oft Dampfspektren einen viel komplizierteren Bau besitzen, als die Spektren der entsprechenden homogenen Flüssigkeiten und deren Lösungen. H a r t l e y fand im Benzoldampf etwa 80 Banden, während er in alkoholischen Benzollösungen nur 6 bis 7 Banden beobachtete. Uebrigens ergaben neuere Messungen bei K a y s e r noch weitere sehr schmale Banden in den Lösungsspektren; immerhin sind diese viel einfacher als die Dampfspektren.

Der Einfluß der T e m p e r a t u r wird in vielen Fällen durch Aenderung des Dissoziationszustandes der Gasmoleküle zu erklären sein. Auf die zahlreichen Arbeiten über den Einfluß der Temperatur auf die Absorption der Dämpfe von Kalium, Natrium, Schwefel, Jod usw. kann nur hingedeutet werden, zumal hier noch manche Widersprüche ungeklärt sind. Bei relativ einfach gebauten organischen Stoffen, z. B. dem Aceton, war das Absorptionsspektrum des Dampfes von 10° und 180° annähernd identisch bei Gültigkeit des B e e r schen Gesetzes. Bei vielen Arbeiten über den Temperatur-

einfluß auf das Absorptionsspektrum von Gasen ist leider versäumt worden, eine solche Versuchsanordnung zu treffen, daß nicht mit Erhöhung der Temperatur auch eine Vergrößerung des Drucks verbunden war. Kayser vermutet, daß in diesen Fällen die oft beobachtete Verbreiterung der Banden auf Rechnung des Drucks, die qualitative Aenderung des Spektrums auf Rechnung der Temperatur kommt.

5b) Veränderlichkeit der Lösungsspektren. Die eingangs erwähnte Tatsache, daß manche Stoffe in Lösungen ein auffällig konstantes Absorptionsspektrum haben, während die Mehrzahl der Verbindungen je nach den Bedingungen der Untersuchung (nach Lösungsmittel, Konzentration, Temperatur), ihre Spektra ändern, veranlaßte fast ebenso viele Erklärungsversuche wie Untersuchungen. Die Schwierigkeit liegt darin, daß die zahlreichen Momente, welche in einer Lösung den Absorptionsmechanismus beeinflussen können, nicht unabhängig voneinander so zu variieren sind, daß die vermutete Beziehung eindeutig hervortritt.

α) Optische Konstanz koordinativ gesättigter Komplexe (Hantzsch). Eine entschiedene Wendung zugunsten einer chemischen Theorie der Veränderlichkeit der Absorptionsspektren führte Hantzsch herbei. Er untersuchte die Absorption von Stoffen mit koordinativ gesättigten farbigen Komplexen (vgl. Werners Theorie der Koordinationszahlen in dem Artikel „Valenz"). Bei diesen Komplexen sollten nach Werner chemische Aenderungen beim Lösungsvorgang ausgeschlossen sein. Tatsächlich fand Hantzsch bei den farbigen gesättigten Komplexen auffällige Beständigkeit der Spektren: keine Verschiebung der Absorptionsgrenzen, Gültigkeit des Beerschen Gesetzes. Hieraus scheint ferner hervorzugehen, daß die sogenannten physikalischen Einflüsse, die natürlich auch für die gesättigten Komplexe bestehen und welche bei diesen Messungen möglichst variiert wurden, einen sehr untergeordneten Einfluß auf die Lösungsspektren haben. Wenn die Theorie von Hantzsch durchweg experimentelle Bestätigung finden sollte, so ist ihre Bedeutung klar: die Inkonstanz von Lösungsspektren ist dann stets ein Hinweis auf chemische Vorgänge, die vielleicht mit anderen Methoden schwer oder gar nicht nachgewiesen werden können. Die Spektroskopie würde hiermit eine wichtige Untersuchungsmethode auf dem Gebiete der Lösungstheorien und der chemischen Konstitutionsforschung werden.

Eine Einschränkung erscheint aber schon jetzt gestattet: Zwar verhalten sich gesättigte Komplexe wie

$$[PtCl_6]'' \quad [MnO_4]' \quad [O_3Cr{-}O{-}CrO_3]'' \quad [Cu(NH_3)_4]^{\cdot\cdot}$$

bei Aenderungen der Konzentration sehr beständig bezüglich der Absorptionsspektren; auch ein Einfluß des Lösungsmittels, soweit solche Untersuchungen möglich waren, scheint nicht zu bestehen. Ein, wenn auch kleiner, Temperatureinfluß ist aber sicher nachgewiesen worden. So verschieben sich die Banden des MnO'_4 bei Erwärmung der Lösungen von 20° auf 80° um wenigstens 1,5 $\mu\mu$ nach Rot. Ist diese Verschiebung auf eine Aenderung des chemischen Sättigungsgrades zurückzuführen oder beginnen hier die physikalischen Effekte? Gibt es überhaupt völlig gesättigte Komplexe? Diese Fragen sind noch ungelöst. Immerhin besteht aller Grund zu der Annahme, daß wesentliche spektrale Aenderungen beim Lösungsvorgang auf chemischen Ursachen beruhen.

β) Einfluß der Konzentration. Die Frage, wie sich das Absorptionsspektrum eines Stoffes mit seiner Konzentration in Lösung ändert, hat nicht nur ein theoretisches, sondern auch ein hervorragend praktisches Interesse. Ist doch die Unabhängigkeit der Absorption von der Konzentration, also die Gültigkeit des Beerschen Gesetzes, die Voraussetzung der Möglichkeit einer quantitativen Spektralanalyse. Daher ist die Feststellung wichtig, daß das Gesetz von Hantzsch für Aenderungen der Konzentration besonders gut stimmt; Messungen in sehr weiten Konzentrationsbereichen ergaben scharfe Gültigkeit des Beerschen Gesetzes, das in einigen Fällen sogar bis zum festen Zustand stimmt, z. B. für Kupfersulfat, oder im Ultraviolett für Kaliumnitrat. Also auch der Einfluß des Dissoziationszustandes, der früher so sehr in den Vordergrund gestellt wurde, kommt für die Absorptionsspektra von Elektrolyten mit gesättigten Komplexen nicht in Frage (siehe 6 a).

γ) Einfluß der Lösungsmittel. Für gesättigte Komplexe muß nach Hantzsch die Natur der Lösungsmittel ohne Einfluß sein. In den wenigen Fällen, in denen eine solche Untersuchung möglich war, z. B. bei den Salzen der Platinchlorwasserstoffsäure, blieben die Absorptionsspektra in der

Tat unverändert. Leider sind weitergehende Untersuchungen in dieser Richtung dadurch begrenzt, daß die Stoffe mit gesättigten farbigen Komplexen nur in wenigen Medien löslich sind. Daher ist früher der Einfluß der Lösungmittel vorwiegend an chemisch ungesättigten Stoffen geprüft worden, und es ist nicht verwunderlich, daß Abweichungen in großer Mannigfaltigkeit gefunden wurden. Kundt glaubte hieraus ein Gesetz ableiten zu können: „Hat ein farbloses Lösungsmittel ein beträchtlich größeres Brechungs- und Dispersionsvermögen als ein anderes, so liegen die Absorptionsstreifen einer in den Medien gelösten Substanz bei Anwendung des ersten Mittels dem roten Ende des Spektrums näher als bei Benutzung des zweiten" (Kundtsche Regel). Spätere Prüfungen ergaben so viele Ausnahmen, daß von einer allgemein gültigen Regel keine Rede sein kann. Trotzdem stimmt die Kundtsche Regel in bemerkenswert vielen Fällen, die aber vielleicht anders erklärt werden können.

Während Kundt auf eine theoretische Begründung seiner empirisch gefundenen Regel verzichtete, wies später Knoblauch darauf hin, daß die Kundtsche Regel gültig sein müsse, wenn man die optische Absorption als eine elektrische Resonanzerscheinung auffaßt und die Moleküle als Hertzsche Resonatoren betrachtet. Dann muß die Schwingungsdauer proportional der Wurzel aus der Dielektrizitätskonstanten sein, und, da diese proportional dem Quadrate des Brechungsexponenten ist, so muß auch die Schwingungsdauer proportional dem Brechungsexponenten sein. Wenn es also richtig ist, daß der Absorptionsmechanismus als elektrische Resonanzerscheinung gedeutet werden kann, so müßte die Kundtsche Regel gültig sein; sie müßte also auch für die gesättigten Komplexe gelten. Da dies nicht der Fall zu sein scheint, — genügende Präzisionsmessungen liegen noch nicht vor — so wären entweder die Voraussetzungen unrichtig, oder aber, der Effekt ist viel kleiner, als bei den von Kundt beobachteten Fällen, wo vielleicht außer dem Brechungsvermögen noch andere Einflüsse (Solvatation) vorliegen.

δ) Einfluß des Solvatationszustandes des gelösten Stoffes. Der Solvatationszustand scheint einen großen, vielleicht ausschlaggebenden Einfluß auf die Veränderlichkeit der Absorptionsspektren zu haben. Die freien Restaffinitäten ungesättigter Stoffe werden durch die Moleküle der Lösungsmittel beansprucht; oder, wie es Kauffmann ausdrückt: die Kraftlinien des gelösten Stoffes werden gewissermaßen in das Lösungsmittel hineingezogen. So ist eine Beeinflussung des Schwingungszustandes in den absorbierenden Molekülen wohl verständlich, und es besteht jedenfalls die Möglichkeit, die Veränderlichkeit der Lösungsspektren unter diesem Gesichtspunkt zu betrachten. Aenderungen der Konzentration und der Temperatur, Zusätze fremder, scheinbar chemisch indifferenter Stoffe werden immer den Solvatationszustand ändern können. Auch der chemische Sättigungsgrad der Lösungsmittel selbst gibt eine genügende Erklärung für die Aenderungen der Absorptionsspektren mit den Lösungsmitteln. So hat Schaefer z. B. für das Ultraviolettband des Acetons nachgewiesen, daß eine Verschiebung dieses Bandes nach kurzen Wellenlängen um so stärker stattfindet, je ungesättigter das Lösungsmittel ist; also im Sinne der Reihe Hexan, Aether, Aethylalkohol, Methylalkohol, Wasser. Aceton, das in Hexan, also einem chemisch ganz indifferenten gesättigten Stoffe, gelöst ist, absorbiert identisch wie Aceton dampf, wo also ebenfalls keine Sättigung von Restaffinitäten stattfinden kann. Daß bei der Lösung von Aceton in den anderen Lösungsmitteln eine Solvatation in wachsendem Maße stattfindet, wurde durch thermische Messungen wahrscheinlich gemacht.

Ich glaube, daß im Sinne von Solvatationsvorgängen häufig auch die Gültigkeit der Kundtschen Regel gedeutet werden kann. Besteht doch im allgemeinen eine Parallelität zwischen dem chemischen Sättigungsgrade von Flüssigkeiten und ihren Dielektrizitätskonstanten, also auch ihrem Brechungsvermögen (vgl. die Artikel „Lösungen" und „Valenz").

ε) Einfluß der Temperatur auf das Lösungsspektrum. Dieser Einfluß ist häufig im Sinne der Betrachtungen im vorigen Abschnitt zu beurteilen. Stets sind Veränderungen der Lösungsspektren durch die Temperatur nachweisbar, oft in geringem Maße, wie bei den gesättigten Komplexen, in manchen Fällen so beträchtlich, daß der ganze Charakter der Spektren verändert wird. Dann scheinen aber gleichzeitige tiefgreifende chemische Aenderungen die eigentliche Ursache zu sein. Häufig wird auch ein Gleichgewicht in der Lösung verschoben; z. B. beim Cuprichlorid

$2CuCl_2$	$\rightleftarrows$	$Cu(CuCl_4)$
normales Salz		komplexes Salz
blau		grün

Meist werden die Absorptionsbanden mit steigender Temperatur verwaschener und fast immer wandern sie — wenn sie sich überhaupt verschieben — nach Rot. Selektive und allgemeine Absorptionen scheinen sich in verschiedener Weise mit der Temperatur zu ändern. So wächst die allgemeine Absorption am kurzwelligen Ende des Spektrums wohl immer mit steigender Tempera-

tur, während Banden unverändert bleiben können, z. B. bei den Nitraten.

5c) Veränderlichkeit der Absorptionsspektra fester Stoffe. α) Dichroismus. Trichroismus. Schon früh wurde beobachtet, daß in manchen Fällen die Absorption in Kristallen abhängig ist von der Durchgangsrichtung des Lichts. Die Unterschiede der Absorptionsspektren beziehen sich nie auf die Lage der Banden, sondern sie bestehen nur in Unterschieden des Extinktionsvermögens: dieses kann sich aber so ändern, daß Banden ganz verschwinden. Bei einachsigen Kristallen sind zwei Spektren zu unterscheiden: das ordinäre Spektrum (entsprechend Schwingungen senkrecht zur Achse) und das extraordinäre Spektrum (entsprechend Schwingungen parallel zur Achse). Daher erscheinen einachsige Kristalle oft in zwei verschiedenen Farben (Dichroismus). Bei optisch zweiachsigen Kristallen gibt es 3 ausgezeichnete Schwingungsrichtungen, denen 3 verschiedene Spektren entsprechen (Trichroismus). Die Hauptrichtungen der Absorption (Absorptionsachsen) fallen nicht mit den Elastizitätsachsen zusammen (vgl. den Artikel „Kristalloptik").

β) Einfluß der Temperatur. Der Einfluß der Temperatur auf die Absorption ist bei manchen Stoffen sehr augenfällig. Natürlich müssen die Stoffe ausgeschaltet werden, welche beim Erhitzen chemische Veränderungen erfahren, etwa durch Verlust von Kristallwasser (Kupfersulfat), oder durch Umwandlung in eine andere Modifikation (Quecksilberjodid). Aber es bleiben noch sehr viele Fälle, bei denen jede chemische Erklärung versagt. Natriumbichromat wird schon bei 200° braun; beim Abkühlen erscheint sofort wieder das ursprüngliche Rot. Arsenbisulfid (Realgar; orange), Bleijodid (orange) werden rot. Bleichromat (gelb) wird orange. Umgekehrt werden viele farbige Stoffe bei tiefen Temperaturen heller: Bleijodid (orange) wird bei —190° hellgelb; Jodoform (gelb) wird weiß. Jod, Schwefel, Phosphor werden heller. Nach Moissan und Dewar werden Fluor, Chlor, Brom, Jod bei —253° weiß. Verhältnismäßig selten sind diese Erscheinungen spektroskopisch untersucht worden; aber allgemein scheinen die Absorptionsbanden mit steigender Temperatur nach Rot verschoben zu werden. Besonders augenfällig werden die Temperatureinflüsse, wenn ein Absorptionsband aus dem Ultraviolett in das sichtbare Spektrum wandert, oder wenn ein Band aus dem sichtbaren Spektrum in das Ultrarot gelangt. Aus diesen Gründen braucht auch nicht immer mit steigender Temperatur ein Dunklerwerden der Farben einzutreten. Ueber die Aenderung des Extinktionsvermögens mit der Temperatur ist noch wenig bekannt.

Zur Erklärung der Veränderlichkeit der Absorptionsspektren fester Stoffe sind manche Hypothesen entstanden, die aber, nach Kayser, völlig wertlos sind. Diese Unklarheit wird auch wohl erst bei einem tieferen Einblick in den Absorptionsmechanismus selbst behoben werden.

6. Bedeutung der Absorptionsspektren für chemische Probleme. Die Schwierigkeiten der Anwendung der Spektroskopie auf chemische Probleme liegen darin, daß man nicht genau weiß, was man eigentlich durch die Absorptionsspektren mißt. So konnte es vielfach geschehen, daß die Ergebnisse spektroskopischer Arbeiten von Anhängern und Gegnern einer neuen physikalischen oder chemischen Theorie in gleicher Weise zu ihren Gunsten gedeutet wurden. Ein tieferer Einblick in die Konstitution der Materie ist am wahrscheinlichsten an der Hand der Spektroskopie möglich, und es ist erklärlich, daß schon jetzt Hypothesen diesen Zusammenhang aufklären wollen. Wenn wir auch von der Lösung dieser Fragen weit entfernt sind, so steht doch fest, daß die Spektroskopie der modernen Chemie in den letzten Jahren aussichtsreiche neue Wege gezeigt hat.

Einige chemische Probleme sollen im Zusammenhang mit spektroskopischen Untersuchungen erörtert werden. Die Theorien, welche diese Beziehungen erklären wollen, haben vielfach einen sehr hypothetischen Charakter, und es ist möglich, daß neue Erkenntnisse über die Natur der Materie dieses Kapitel wesentlich umgestalten werden.

6a) Absorptionsspektren und Dissoziationstheorie. Es lag nahe, daß nach Aufstellung der Dissoziationstheorie alle Untersuchungsmethoden herangezogen wurden, um diese Theorie zu prüfen. Eben so viele Gründe für wie gegen die Theorie wurden aus den Absorptionsspektren abgeleitet. Eine Zusammenstellung findet sich in dem III. Bande von Kaysers Spektroskopie und in der Monographie von Rudorff.

Unzweifelhaft ist oft ein unzulässiger Zusammenhang zwischen Absoprtionsspektren und der elektrolytischen Dissoziation angenommen worden. Ich glaube, daß man aus dem vorliegenden Material nur folgenden Schluß ziehen kann: Alle Absorptionserscheinungen können so erklärt werden, daß sie mit der Dissoziationstheorie in Einklang stehen; aber es ist auch kein zwingender direkter spektralanalytischer Beweis für die Dissoziationstheorie erbracht worden.

Es erscheint als eine Konsequenz der Dissoziationstheorie, daß alle Elektrolyte mit gemeinsamem farbigen Ion, z. B. die Permanganate des Li K Na NH_4 usw, bei ge-

nügender Verdünnung, also bei vollständiger Dissoziation, identische Absorptionsspektren geben müssen. In einer grundlegenden Arbeit wird dies von Ostwald für 300 Salze bewiesen. Wenige scheinbare Ausnahmen konnten durch chemische Vorgänge (Hydrolyse usw) aufgeklärt werden. Die Ergebnisse von Ostwald stehen also nicht im Widerspruch zur Dissoziationstheorie; sie bilden aber auch keinen Beweis für diese. Denn z. B. das Kaliumpermanganat ändert sein Absorptionsspektrum überhaupt nicht mit dem Dissoziationsgrade. Aehnliches gilt für das Kupfersulfat, Kaliumbichromat usw, wo ja selbst beim Uebergang in den festen Zustand das Absorptionsspektrum konstant bleibt. Diese Tatsachen könnten eher gegen die Dissoziationstheorie sprechen. Untersucht man dann die wenigen Fälle, wo reine Proportionalität zwischen Dissoziationsgrad, gemessen durch elektrische Leitfähigkeit, und optischen Veränderungen gefunden wurden, z. B. bei den Salzen der Violursäure (Donnan), so scheint es, als ob die optischen Effekte nicht eine direkte Folge der Dissoziation sind, sondern daß hier chemische Aenderungen des Säurerestes maßgebend sind, die aber in kausalem Zusammenhang mit der Dissoziation stehen können.

Nachdem jetzt durch die Arbeiten von Hantzsch bekannt ist, daß koordinativ gesättigte Komplexe optisch konstant bleiben, mögen sie in ionisiertem Zustande vorliegen, oder als Bestandteil des undissoziierten Moleküls, scheinen spektroskopische Methoden überhaupt wenig geeignet zu sein, die Dissoziationstheorie zu beweisen.

Bei seinen wichtigen Untersuchungen über die ultravioletten Absorptionsspektren der Nitrate fand Hartley, daß das Absorptionsband der NO_3-Gruppe nicht bei allen Nitraten gleich ist, sondern daß eine Verschiebung nach Rot eintritt mit wachsendem Atomgewicht des Metalls. Hartley glaubt so einen Beweis gegen die Unabhängigkeit der Ionen gefunden zu haben; er nimmt nur einen Zustand intramolekularer Spannung an. Diese Unterschiede der NO_3-Absorption erklärte Schaefer teilweise durch die allgemeine Absorption der Kationen, die mit dem Atomgewicht wächst und sich über die selektive NO_3-Absorption lagert, wodurch eine scheinbare Verschiebung der Bänder entsteht. Außerdem arbeitete Hartley mit Lösungen, in denen die Dissoziation der Nitrate noch unvollständig war. Während für Alkalinitrate das Beersche Gesetz streng gilt, trifft dies nicht mehr zu für Lösungen von Silbernitrat oder Thallonitrat. Die Hartleyschen Arbeiten bilden also keinen Beweis gegen die Dissoziationstheorie (vgl. den Artikel „Elektrolytische Dissoziation").

6b) Theorie der Isorrhopesis von Baly. Wir verdanken Baly die ersten zielbewußten Bestrebungen, einen Zusammenhang zwischen den Absorptionsspektren und den Eigenschaften der Stoffe aufzuweisen. Die Schwierigkeiten einer Einsicht in derartige genetische Zusammenhänge sind offenbar sehr groß, da wir sowohl über den Absorptionsmechanismus, wie über das Wesen der Affinität gänzlich im Unklaren sind. Aus den zahlreichen Arbeiten Balys sollen seine Untersuchungen über die Ultraviolettabsorption der Ketone angeführt werden, um die Isorrhopesistheorie zu veranschaulichen. Die aliphatischen Ketone, an der Spitze das Aceton CH_3COCH_3 absorbieren im Ultraviolett selektiv. Den Sitz dieser Absorption erkannte Baly in der ungesättigten Carbonylgruppe CO. Aus Untersuchungen von Lapworth war bekannt, daß die Reaktionsfähigkeit oder die chemische Aktivität der Carbonylgruppe bei den Ketonen abnimmt, je größer die benachbarten Gruppen sind. So nimmt die Reaktionsgeschwindigkeit der Oximbildung, ferner der Addition von Bisulfiten ab in der Reihe

CH_3COCH_3	$CH_3COC_2H_5$	$C_2H_5COC_2H_5$
	usw	
1. Aceton	2. Methyläthylketon	3. Diäthylketon

In gleicher Weise nimmt auch die sogenannte Persistence AB AC AD der Bänder (d. h. der Ordinatenabstand der Umkehrpunkte der Absorptionskurven) ab.

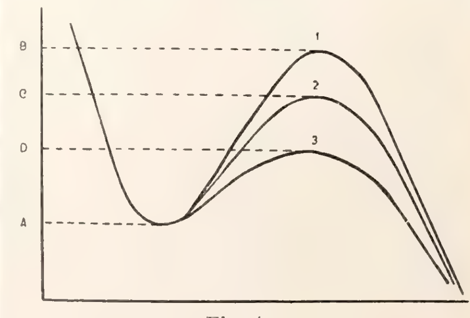


Fig. 4.

Die intramolekularen Schwingungen in der Carbonylgruppe, die einerseits die Lichtabsorption bewirken, entsprechen andererseits der chemischen Reaktionsfähigkeit der Carbonylgruppen. Den Schwingungszustand nennt Baly Isorrhopesis. Zweifellos fehlt der Isorrhopesistheorie in dieser unbestimmten Fassung die mechanistische Anschaulichkeit. Später geht Baly, in dem Bestreben, chemische Symbole zur Erläuterung der Isorrhopesis zu benutzen, zu weit. So erklärt er das Absorptionsband des Acetessigesters durch eine isorrhopische

Schwingung im Sinne einer Enol-Keto-Tautomerie

$$\underset{\text{Enolform}}{CH_3.C(OH)=CH.COOC_2H_5} \leftrightarrows \underset{\text{Ketoform}}{CH_3.C(=O)-CH_2COOC_2H_5}$$

Bei den Schwingungen wird also dasselbe Molekül abwechselnd in einen Enol- und Ketozustand versetzt. Zwar nimmt Baly nicht an, daß das bewegliche H-Atom zwischen den C- und O-Atomen mit Lichtgeschwindigkeit pendelt; vielmehr befähige die Isorrhopesis das Molekül abwechselnd als Keton und als Enol zu reagieren. Diese Verquickung der Isorrhopesis mit der Tautomerie hat der Balyschen Theorie Abbruch getan, um so mehr als später Hantzsch den Absorptionserscheinungen des Acetessigesters eine ganz andere Deutung geben konnte.

Trotzdem hat die Isorrhopesistheorie außerordentlich anregend gewirkt, indem sie dazu beitrug, die starren Auffassungen der älteren Strukturchemie zu beseitigen zugunsten einer mehr dynamischen Vorstellung über den intramolekularen Bau. Im Hinblick hierauf soll auch die Bedeutung der Spektroskopie für die Erforschung des Benzols und seiner Derivate noch kurz berührt werden.

Wie früher angeführt wurde, zeigt das Benzolspektrum eine große Veränderlichkeit. Dies tritt sehr auffällig bei Substitutionen hervor, und zwar gilt dies auch für solche Substituenten, die chemisch betrachtet als sehr indifferent gelten, z. B. Methylgruppen. Diese Erscheinungen sprechen für eine große Empfindlichkeit des Benzolringes; man darf ihn nicht mehr als starr annehmen, sondern man wird den Erscheinungen besser Rechnung tragen, wenn man rhythmische Schwingungen annimmt, ähnlich wie sie in einem elastischen Ringe erzeugt werden können. Hierbei konnten verschiedene bevorzugte Zustände des Ringes mit dem chemischen Verhalten der Benzolderivate gut in Einklang gebracht werden (Kauffmann). Näheres in dem Artikel „Organische Chemie“. Für die Konstitutionsbestimmung aromatischer Verbindungen hat die Absorptionsspektroskopie unzweifelhaft schon bedeutende Erfolge gehabt (Hartley, Baly, Hantzsch). In dieser Hinsicht hat Baly bleibende Verdienste, wenn auch wieder seine chemische Formulierung der Isorrhopesis im Benzol (Sprengung und Bildung von Doppelbindungen) kaum aufrecht zu erhalten ist.

6c) Theorie der Valenzelektronen von Stark. Angesichts der Entwickelung der Elektronik lag es nahe, den ursächlichen Zusammenhang zwischen optischem und chemischem Verhalten im Elektron zu suchen. Stark unternimmt es, das Problem der chemischen Affinität durch die Hypothese von Valenzelektronen zu lösen, und macht hierzu die Annahme von gesättigten, ungesättigten und gelockerten Valenzelektronen, je nach ihrer Bindung und Lagerung auf der positiv geladenen Sphäre des Atoms. Bei der Loslösung und Wiederanlagerung der Elektronen wird die kinetische Energie in elektromagnetische Strahlungsenergie umgewandelt. Aus der Gesamtheit der Wellenlängen, welche so emittiert werden, resultieren Doppelbanden, von denen die eine nach Ultrarot, die andere nach Ultraviolett abschattiert ist. Stark berechnet nach dem Planckschen Elementargesetz der Strahlung eine untere Grenze für die emittierten Wellenlängen. Mit Hilfe der Starkschen Annahmen sind die optischen Effekte bei chemischen Vorgängen wohl zu verstehen. Bei einer Substitution im Benzolkern z. B. wird der „Lockerungskoeffizient“ von Valenzelektronen des Benzols geändert. Zweifellos besitzt die Starksche Theorie den Vorzug plastischer Anschaulichkeit; aber eine gewisse Willkürlichkeit der Annahme ist wohl kaum zu bestreiten (vgl. den Artikel „Valenz“).

6d) Chemische Theorie der Veränderlichkeit der Absorptionsspektren (Hantzsch). Wie schon unter 5bα dargestellt wurde, hat Hantzsch die Theorie aufgestellt, daß alle Aenderungen der Absorptionsspektren auf chemische Ursachen zurückzuführen sind. Die Konstanz der Absorptionsspektren in Fällen, in denen chemische Effekte unwahrscheinlich sind, gibt diesen Auffassungen eine gewichtige Stütze. Besonders in der organischen Chemie werden von Hantzsch aus der Veränderlichkeit der Spektren Schlüsse auf konstitutive Aenderungen gezogen. Dieses Verfahren kann häufig zu einer Entscheidung führen, wenn aus strukturchemischen Erwägungen eine begrenzte Zahl von Konstitutionsformeln möglich ist. Auf die wichtigen Ergebnisse dieser Methodik für Isomerieprobleme kann hier nur verwiesen werden (siehe besonders Ley Konstitution und Farbe). Die Theorie der Pseudosäuren und Pseudobasen ist zuerst auf Grund optischer Befunde entwickelt worden; häufig haben auffällige Farbänderungen auf chemische Umlagerungen bei der Salzbildung aufmerksam gemacht, z. B. bei den Aminoazoverbindungen, wo zwei Reihen von Salzen festgestellt wurden, die folgende Formulierung fanden

$$C_6H_5.N = N.C_6H_4NR_2HX$$
Azoide Salze
orangegelb

$$C_6H_5NH.N = C_6H_4 = NR_2X$$
Chinoide Salze
violett

Die Theorie der Indikatoren ist wieder

im Sinne chemischer Umlagerungen bei der Salzbildung neu begründet worden

$C_6H_4.CO$ — C—O — HO (Phenolphtaleïn Lakton farblos) C_6H_4 — COONa — C — O (Na-Salz chinoid farbig)

Ebenso wurde auch für den Indikator Helianthin (Dimethylamidoazobenzolsulfosäure) und sein Natriumsalz (Methylorange) der Beweis einer chemischen Umlagerung erbracht.

Die chemische Theorie der Veränderlichkeit der Absorptionsspektren verzichtet auf eine Erklärung, wie der Zusammenhang zwischen Absorptionsspektren und chemischer Konstitution zu deuten ist. Die Spektroskopie wird von den Vertretern der chemischen Theorie gewissermaßen als Kompaß für die rein chemische Forschung gebraucht. Das bisher gewonnene Material berechtigt wohl zu dem Schlusse, daß chemischen Effekten der entscheidende Einfluß auf die Veränderlichkeit der Absorptionsspektren zukommt; ob den alleinigen Einfluß, darf noch bezweifelt werden, schon im Hinblick auf die Temperaturveränderlichkeit der Absorptionsspektren vieler festen Stoffe, für die jede chemische Erklärungsmöglichkeit fehlt. Ob nun die weitere Entwickelung zur Annahme noch feinerer chemischer Vorgänge führt — wozu mit der Konstruktion von Nebenvalenzisomerien schon begonnen worden ist — oder ob die „chemische Theorie" eine Einschränkung erfahren muß, ist noch nicht abzusehen.

7. Absorptionsspektren und chemische Konstitution. Wie in Abschnitt 3 entwickelt wurde, hat jeder Stoff ein charakteristisches Absorptionsspektrum; in erweitertem Sinne ist also jeder Stoff farbig. Nun haben aber Stoffe mit starker Absorption im sichtbaren Spektrum besonderes Interesse, in erster Linie für die Farbstoffchemie. Deshalb suchte man Atomgruppierungen zu finden, welche die sichtbare Farbigkeit hervorrufen. Wenn sich auch eine geordnete Systematik nicht diese Beschränkung auf den sichtbaren Spektralbereich auferlegen sollte, so hat doch die Forschung dieses Gebiet bevorzugt, und die in diesem Abschnitt angeführte Nomenklatur wird gewöhnlich nur auf sichtbar gefärbte Stoffe angewandt.

7a) Die Chromophortheorie. Die Arbeiten von Graebe und Liebermann über Farbstoffe führten zu der von Witt aufgestellten Chromophortheorie. Chromophore sind Atomgruppen, welche die Farbigkeit bedingen. Verbindungen, die Chromophore enthalten, heißen Chromogene.

α) Die wichtigeren Chromophore. Nach der Zusammenstellung von H. Ley sind folgende Chromophore besonders wichtig:

1. Aethylengruppe $>C=C<$.

Zwar ist das Aethylen $H_2C=CH_2$ selbst farblos; vielleicht absorbiert es, wie Ley vermutet, im äußersten Ultraviolett. Auch die einfachen Aethylenderivate $R_2C=CR_2$ sind farblos. Bei ringförmiger Anordnung mehrerer Aethylenbindungen tritt Farbe auf

$CH=CH$ / $CH=CH$ $>C=CH_2$

Fulven (gelb)

Daß das Benzol (unter Voraussetzung der Kékuléschen Formel) trotz seiner Aethylenbindungen noch farblos ist, kann durch ihre räumlich weniger dichte Lagerung erklärt werden; immerhin absorbiert das Benzol im Ultraviolett, und häufig tritt durch Einführung von Benzolkernen in farblosen Verbindungen Farbigkeit auf.

2. Carbonylgruppe $=CO$.

Die einfachen Aldehyde R.CO.H und Ketone R.CO.R absorbieren nur im Ultraviolett. Die aliphatischen Diketone, wie $CH_3.CO.CO.CH_3$ sind schon gelb, die Triketone, z. B. $CH_3.CO.CO.CO.CH_3$ sind orange. Zwei Carbonylgruppen in Verbindung mit Benzolringen sind stark farbig.

CO—CO

Benzil (gelb)

CO CO

Phenanthrenchinon (orange)

Hier ist der farbvertiefende Einfluß der Ringbildung (siehe auch VII, 2, a) bemerkenswert. Besonders deutlich wird dieser Einfluß beim Vergleich von

CO CO

Benzophenon (farblos) und Fluorenon (gelb)

3. Gruppe $C=N$.

Ein schwacher chromophorer Effekt dieser Gruppe zeigt sich z. B. im Benzylidenanilin $C_6H_5.CH=N.C_6H_5$ (gelb).

4. Azogruppe $-N=N-$.

Wie schon aus der enormen Zahl der Azofarbstoffe hervorgeht, gehört diese Gruppe zu den wichtigsten Chromophoren. Schon fette Azoverbindungen wie

$CH_2\langle{N \atop N}$ — $N.COOC_2H_5$ | $N.COOC_2H_5$

Diazomethan — Azodicarbonsäureester

sind gelb. Allerdings sind auch farblose Azoverbindungen bekannt.

5. Azoxygruppe

$-N-N-$ (mit O an beiden N) und $-N=N-$ (mit $\|$ O)

Diese Gruppe ist ein schwächerer Chromophor als die Azogruppe, wie aus der Farbe der entsprechenden Azoxy- und Azoverbindungen hervorgeht.

6. Nitrosogruppe $-N=O$.

Bei direkter Bindung an C fungiert die Nitrosogruppe als sehr starker Chromophor

$(CH_3)_3C-N=O$ — $C_6H_5-N=O$

Nitrosotertiärbutan (blau) — Nitrosobenzol (grün)

Bei anderen Bindungen, z. B. an N ist die chromophore Wirkung der Nitrosogruppe viel geringer; z. B. bei $C_6H_5-N\langle{CH_5 \atop N=O}$

7. Nitrogruppe

$-N\langle{O \atop O}$ und $-N\langle{O \atop O}$

Benzol ist farblos, Nitrobenzol $C_6H_5NO_2$ ist gelblich; hier ist die Absorption aus dem Ultraviolett bis teilweise ins sichtbare Violett vorgerückt. Wahrscheinlich unterstützen sich hier die chromophoren Wirkungen der Nitrogruppe und der Aethylenbindungen des Benzolrings gegenseitig.

8. Gruppe $=N=O$ ($N=4$ wertig) ist nach Hantzsch in den Salzen der Stickoxyddisulfonsäure $(KSO_3)_2=N=O$ anzunehmen; im festen Zustande ist die Farbe orange, im gelösten violett. Auch das braune Stickstoffdioxyd enthält wahrscheinlich diesen Chromophor.

9. Thiocarbonylgruppe $C=S$.

Diese Gruppe hat eine stärkere chromophore Wirkung als die Carbonylgruppe (2)

$C_6H_5.CS.CH_3$

(1) Thioacetophenon (blau)

$C_6H_5.CO.CH_3$

(2) Acetophenon (farblos)

10. Chinoide Bindung.

Die sogenannte chinoide Atomgruppierung, wie sie in den Chinonen

p-Chinon: $C=O$, $HC{=}CH$, $HC{=}CH$, $C=O$ — o-Chinon: CH, HC, $C=O$, HC, $C=O$, CH

p-Chinon — o-Chinon

anzunehmen ist, wird für viele Farbstoffe als wichtigster Grund für die Farbigkeit angesehen. Auf die außerordentlich zahlreichen Fälle chinoider Bindung kann hier nur hingewiesen werden. Das o-Chinon ist dunkler gefärbt als das p-Chinon; dies ist wahrscheinlich durch die räumliche Nähe der $C=O$-Gruppen bedingt.

Wenn eine chinoide Bindung (I) in eine benzoide Bindung (II) übergeht, tritt Aufhellung oder Farblosigkeit ein

I: $C=O$ … $C=O$ — II: $C-O$ … $C-O$ — I: $C=O$, $C=O$ — II: $C-O$, $C-O$

I — II — I — II

β) Wirkung mehrerer Chromophore. Durch die Anwesenheit mehrerer Chromophore scheint eine stärkere chromophore Wirkung zu entstehen als bei einer Summation der einzelnen chromophoren Effekte zu erwarten wäre. So ist das Chalkon

$C_6H_5CH=CH.CO.C_6H_5$

gelb. Hier verstärken sich die Wirkungen der Aethylenbindungen und die der Carbonylgruppe gegenseitig.

γ) Doppelbindungen. Ein Ueberblick über die chromophoren Gruppen zeigt, daß sie ausnahmslos ungesättigt sind. Es liegt nahe, die Doppelbindungen in Zusammenhang mit den Absorptionserscheinungen zu bringen, denn bei dem Uebergang in einfache Bindungen tritt Farblosigkeit ein, wie längst bekannt ist

$C_6H_5-N=N-C_6H_5 \rightarrow C_6H_5NH-NH.C_6H_5$

Azobenzol (farbig) — Hydrazobenzol (farblos)

$O=C_6H_4=O \rightarrow HO-C_6H_4-OH$

Chinon (farbig) — Hydrochinon (farblos)

δ) Selbständige und unselbständige Chromophore. Einige Chromophore, wie die Azo- oder Nitrosogruppe, vermögen schon allein sichtbare Farbigkeit hervorzurufen; andere, wie die Aethylen- oder Carbonylgruppen, haben geringere Wirkung, die meist nur im Ultraviolett erkennbar ist. Hier ist die Anwesenheit mehrerer Gruppen nötig, damit die Absorption bis in das sichtbare Spektrum reicht. Jene Gruppen heißen nach Kauffmann „selbständige", diese „unselbständige" Chromophore. Ein tieferer Unterschied besteht nicht; es handelt sich nur um graduelle Verschiedenheiten der Wirkung.

7b) Auxochromtheorie. α) Bathochrome und hypsochrome Gruppen. Bei allen Verbindungen wird die Farbe durch Einführung weiterer Gruppen verändert, auch wenn diese keine Chromophore sind. Besondere Wirkung kommt einer Anzahl von reaktionsfähigen Gruppen (z. B.

OH oder NH_2) zu, welche daher von Witt Auxochrome genannt wurden. Auxochrome Gruppen bewirken meist eine Verschiebung der Absorptionsbanden; sowohl in der Richtung nach längeren wie nach kürzeren Wellenlängen. Solche Gruppen, welche die Absorption nach Rot verschieben, heißen bathochrome, die anderen hypsochrome Gruppen.

Wellenlängen $\mu\mu$ etwa:	Spektrum	Komplementärfarben
bis 395	ultraviolett	—
395—425	violett	grüngelb
425—455	indigo	gelb
455—490	blau	orange
490—510	blaugrün	rot
510—530	grün	purpur
530—550	grüngelb	violett
550—590	gelb	indigo
590—645	orange	blau
645—725	rot	blaugrün
725—810	purpur	grün
810—60 000	ultrarot	—

↓ Bathoch. Wirkung, Vertief. d. Farbigk. ↓ — ↑ Hypsoch. Wirkung, Erhöh. d. Farbigk. ↑

Die Tabelle zeigt die ungefähren Wellenlängen der Spektralfarben und die zugehörigen Komplementärfarben. Wenn also z. B. durch bathochrome Wirkung ein Absorptionsband aus dem Violett in das Blau verschoben wird, so ändert sich die Farbe des Stoffes von grüngelb nach orange. Aus der Tabelle ist ferner zu ersehen, daß Grüngelb die (chemisch betrachtet) primitivste Farbe ist, welche durch die schwächeren Chromophore erzeugt wird, während die starken Chromophore, z. B. die $N = O$ Gruppe, blaue und grüne Farben entstehen lassen.

Die Farbveränderung durch bathochrome Gruppen heißt auch Farbvertiefung, durch hypsochrome Gruppen Farberhöhung. Diese nicht gerade glückliche Nomenklatur soll also nichts über etwaige Aenderungen des Extinktionsvermögens aussagen, sondern es soll nur die Richtung der Verschiebung der Banden bezeichnet werden. Auch die subjektive Empfindung steht teilweise in Widerspruch zu dieser Nomenklatur; so wird man kaum den Wechsel der Farbe von Grün nach Blau als Farberhöhung empfinden, während dies wieder für den Uebergang von Rot nach Gelb zutrifft.

Bathochrom wirken Hydroxyl- und Amidogruppen; auch die substituierten Amidogruppen, z. B. $N(CH_3)_2$ $N(C_2H_5)_2$; ferner Alkyle und Aryle (Regel von Nietzki); endlich, wenn auch schwächer, die Halogene. Hypsochrom wirken scheinbar immer die Acyle, z. B. CH_3CO, C_6H_5CO.

β) Wirkung der Auxochrome auf die Chromophore. Früher wurde die Wirkung der Auxochrome durch Veränderung der „Belastung" im Molekül erklärt. Diesem Moment kommt, wenn überhaupt, nur eine untergeordnete Bedeutung zu. Ausschlaggebend ist scheinbar die Reaktionsfähigkeit oder chemische Aktivität der Auxochrome, die zu einem Affinitätsaustausch mit den Chromophoren führt. Wenn auxochrome und chromophore Gruppen im Molekül räumlich getrennt sind, so hat man sich die Beeinflussung nicht als Fernwirkung vorzustellen. Am besten verständlich ist die Wechselwirkung unter Annahme der Teilbarkeit der Valenz (vgl. den Artikel „Valenzlehre", besonders Thieles Theorie der Partialvalenzen). Am deutlichsten erfolgt dieser Affinitätsaustausch zwischen auxochromen und chromophoren Gruppen durch Atomketten mit konjugierten Doppelbindungen; durch solche Ketten werden Aenderungen der Affinität gewissermaßen „relaisartig" übertragen.

In analoger Weise lassen sich auch andere Vorgänge, wie Salzbildung, ja Aenderungen des Dissoziationsgrades, als auxochrome Wirkungen deuten. Diese Erklärung ist z. B. für die Verschiebung des Absorptionsbandes durch Salzbildung bei der Cinnamylidenessigsäure und Cinnamylidenmalonsäure gegeben worden (Baly-Schaefer). Die bei der Salzbildung anzunehmende Aenderung der Restaffinität der Carbonylgruppen werden durch die konjugierten Doppelbindungen bis zum eigentlichen Chromophor, dem Benzolkern, fortgepflanzt.

7c) Absorptionsspektren stereoisomerer Verbindungen. Es war anzunehmen, daß geometrische Isomere meist optisch nicht identisch sind; solche Verschiedenheiten wurden z. B. gefunden bei einigen stereoisomeren Aethylenverbindungen

R_1—C—H	R_1—C—H
‖	‖
R_2—C—H	H—C—R_2
cis-Form	trans-Form

Die höher schmelzenden Formen waren farblos; die tiefer schmelzenden gelb.

Bei den Isomeren des Benzoldiazosulfonats

$C_6H_5.N$	$C_6H_5.N$
‖	‖
$KSO_3.N$	$N.SO_3K$
syn-Form	anti-Form

ist die labile Form mit höherem Energiegehalt tiefer gefärbt als die stabile Form. Ein Zusammenhang zwischen dem Energiegehalt isomerer Formen und ihrer Farbigkeit scheint aber nicht zu bestehen.

Bei den Benzaldoximen

$C_6H_5.CH$	$C_6H_5.CH$
‖	‖
NOH	HON
syn-Form	anti-Form

fand Hartley optische Identität.

Bei optisch isomeren Stoffen, z. B.

mit asymmetrischem C-Atom, wurde natürlich Identität der Spektren gefunden.

7d) Absorptionsspektren von normalen Salzen, normalen Komplexsalzen und inneren Komplexsalzen. Allgemeine Gesichtspunkte für die Aenderung der Absorption mit der Komplexbildung haben sich noch nicht ergeben. Die Lichtabsorption von Metallatomen wird durch veränderte Bindung meist erheblich beeinflußt. Das violette Chromchlorid bildet Komplexsalze aller Farben

$[Cr(NH_3)_6]X_3$ gelb $\left[Cr(NH_3)_5 \atop OH\right]X_3$ orange $[Cr(OH_2)_6]X_3$ violett

Besonderes Interesse verdienen die inneren Komplexsalze, deren Eigenschaften zuerst von Ley erklärt wurden. Zahlreiche Salze besitzen zwar die Zusammensetzung gewöhnlicher Salze, haben aber von diesen sehr abweichende Eigenschaften; besonders ist ihre Fähigkeit zu elektrolytischer Dissoziation sehr verringert, oder auch ganz aufgehoben. Dieses Verhalten ist nach Ley dadurch bedingt, daß hier das Metall nicht nur durch Hauptvalenzen (—), sondern auch noch durch Nebenvalenzen (.......) gebunden ist.

Das Cuprisalz des Glycins (I) wäre zu formulieren

$$\underset{\text{I}}{Cu\begin{matrix} O.CO.CH_2.NH_2 \\ O.CO.CH_2.NH_2 \end{matrix}} \qquad \underset{\text{II}}{Cu\begin{matrix} O.CO.CH_3\ NH_3 \\ O.CO.CH_3\ NH_3 \end{matrix}}$$

wobei auf die Analogie mit dem Ammoniakat des Kupferacetats (II) hinzuweisen ist.

In beiden Fällen ist auch die Farbe abnorm, und es scheint immer eine starke Veränderung der Farbe einzutreten, wenn Nebenvalenzen abgesättigt werden. Bei der Nebenvalenzbindung tritt Ringbildung ein und es ist früher schon betont worden, daß allgemein Ringschließung das Absorptionsspektrum ändert

M— A—B—X
I
normales Salz

A
/ \
M B
\ /
X
II
Komplexes Salz

Offenbar ist auch die Stärke der Nebenvalenz M.....X von Bedeutung für die Farbe, ja man kann erwarten, daß I und II in einer Gleichgewichtsbeziehung zueinander stehen. Ley nennt den Uebergang von II in I „intramolekulare Dissoziation eines inneren Komplexsalzes". Das Gleichgewicht I $\leftrightarrows$ II wird temperaturvariabel sein, und so findet die starke Farbänderung mancher inneren Komplexsalze eine ungezwungene Erklärung. Bei einer spektroskopischen Untersuchung der inneren Komplexsalze findet man meist nur eine Parallelverschiebung der Absorptionskurven, während der Charakter der Kurven ziemlich erhalten bleibt. Immerhin ist diese Verschiebung so beträchtlich, daß z. B. innere Cuprikomplexsalze mit grüner, brauner und roter Farbe bekannt sind. Von größtem Interesse ist es auch, daß Ley stereoisomere innere Komplexsalze gefunden hat; ihre Absorptionskurven waren im Ultraviolett identisch; im sichtbaren Spektrum war ein Band parallel verschoben.

Werner wies darauf hin, daß die sogenannten „Farblacke" große Analogie mit den inneren Komplexsalzen zeigen, und so ist zu erwarten, daß das Studium der inneren Komplexsalze noch wichtige Ergebnisse für die Farbstoffchemie haben wird.

7e) Einfluß der Atomaffinität auf die Absorptionsspektren. Die außerordentliche Festigkeit gewisser Bindungen zwischen Schwermetallen und metalloiden Atomen, z. B. Hg—C Hg—N Fe—O kann den Charakter der betreffenden Salze wesentlich verändern, ja sie kann eine elektrolytische Dissoziation unmöglich machen (Ley). Meist stehen diese Erscheinungen in Zusammenhang mit abnormem optischem Verhalten. Man kann die Fe—O-Bindung geradezu als Chromophor bezeichnen (W. Wislicenus). Ferrirhodanid $Fe(SCN)_3$ ist undissoziiert und abnorm gefärbt. Zahlreiche Kupfer-Alkaliverbindungen mehrwertiger Alkohole, Oxysäuren, Zucker usw. sind von Byk optisch untersucht worden; in allen Fällen wurde der auxochrome Einfluß der starken Metallbindung festgestellt.

7f) Pantochromie. Diese Bezeichnung hat Hantzsch für die Erscheinung eingeführt, daß Salze gewisser farbloser oder schwach gefärbter Säuren mit verschiedenen farblosen Metallen dennoch in allen Farben vorkommen; als Grund wird die Betätigung von Nebenvalenzen gefunden.

7g) Chromotropie. Wenn indifferente Stoffe, wie Nitraniline, Chinone, Salze von Polynitroverbindungen, in mehreren Farben (meist gelb und rot) dargestellt werden können, so nimmt Hantzsch feinere Isomerieerscheinungen an, für die er den Namen Chromotropie eingeführt hat.

7h) Einfluß der Polymerie auf die Absorptionsspektren. Aus den bis jetzt vorliegenden Untersuchungen ist kein klares Bild über diesen Einfluß zu gewinnen. Bei einigen Metallhalogeniden werden Farbänderungen durch Polymerie erklärt. Bei einigen Salzen von Akridin-

basen hat Hantzsch gefunden, daß die trimolekularen Salze braun, monomolekulare Salze gelb sind. In anderen Fällen konnte eine optische Veränderung durch Polymerie nicht erkannt werden.

8. Analytische Bedeutung der Absorptionsspektren. 8a) Qualitative Absorptionsspektralanalyse. Die Ermittelung der Absorptionskurven kann häufig zur Identifizierung von Stoffen benutzt werden, wo andere analytische Methoden weniger geeignet sind oder auch ganz fehlen. Dieses Verfahren ist nicht nur auf farbige Stoffe beschränkt; häufig lassen sich auch farblose Stoffe in farbige Verbindungen überführen, die dann spektralanalytisch bestimmt werden. Voraussetzung ist ferner, daß die untersuchten Stoffe charakteristische Absorptionsspektren von genügender Konstanz haben, und daß nicht Mischungen absorbierender Stoffe vorliegen, deren Spektren sich störend übereinanderlagern.

Bei Spektren mit typischen Banden genügt meist die Messung der Absorptionsgrenzen; je breiter und verwaschener die Banden werden, desto unsicherer wird die Methode.

Die besten Dienste leistet die Spektralanalyse dem Farbstoffchemiker; an der Hand der vorzüglichen Tabellen Formáneks gelingt die Identifizierung vieler Farbstoffe sehr sicher. Auch die Kontrolle der Reinheit von Farbstoffen ist spektroskopisch leicht möglich; zuweilen ist auch die Analyse von Farbstoffgemischen in einer Lösung erfolgreich. In der medizinischen und gerichtlichen Chemie findet die Absorptionsspektralanalyse immer mehr Eingang; z. B. aus den Spektren des Blutfarbstoffs lassen sich oft wichtige Schlüsse ziehen, wie auf Kohlenoxydvergiftungen. Viele Alkaloide sind an ihren Ultraviolettspektren leichter zu erkennen als durch analytische Methoden. Für die Nahrungsmittelchemie sind zahlreiche Verfahren auf spektroskopischer Grundlage ausgearbeitet worden, z. B. zum Nachweis natürlicher und künstlicher Farbstoffe in Weinen usw.

Zu den Vorzügen der Absorptionsspektralanalyse ist auch zu rechnen, daß meist keine Veränderung an dem untersuchten Stoff vorzunehmen ist, und daß, bei intensiv farbigen Stoffen, der Nachweis noch von sehr geringen Mengen möglich ist.

8b) Quantitative Absorptionsspektralanalyse. Die Möglichkeit quantitativer Bestimmungen ist an die Gültigkeit des Beerschen Gesetzes gebunden. Vor Ausarbeitung einer Methode ist festzustellen, ob das Beersche Gesetz wenigstens in dem Spektralbereich gilt, in welchem gemessen werden soll.

Wenn, was theoretisch immer vorzuziehen ist, die Messung der Lichtabsorption für eine bestimmte Wellenlänge stattfinden soll, so benutzt man Spektralphotometer. Für viele, besonders technische Zwecke, genügen oft Absorptionsmessungen von gemischtem Licht; hierzu dienen die Kolorimeter.

α) Spektralphotometrie. Wenn der Extinktionskoeffizient eines Stoffes für Licht einer bestimmten Wellenlänge bekannt ist, so läßt sich aus der Molekularextinktion und der benutzten Schichtdicke der Gehalt der Lösung berechnen. Zweckmäßig begnügt man sich nicht mit Messungen bei einer Wellenlänge, sondern man mißt — unter Berücksichtigung des Verlaufs der Absorptionskurve — in verschiedenen Spektralgebieten. Die Wellenlänge oder die Schichtdicke wählt man so, daß das Verhältnis des einfallenden Lichts zum durchgedrungenen Licht weder zu klein, noch zu groß ist, sonst wird die Methode ganz ungenau. Am genauesten kann gemessen werden, wenn etwa $^3/_4$ des Lichts absorbiert wird. Einige Beispiele quantitativer Spektralanalysen mögen die mannigfache Anwendbarkeit zeigen. Es können genau bestimmt werden Kupfer und Cobalt in sehr geringen Mengen; Cobalt und Nickel nebeneinander; der Gehalt an Indigo; Hämoglobin, Oxyhämoglobin, Kohlenoxydhämoglobin; Purpurin und Isopurpurin nebeneinander; Spuren von Ammoniak und salpetriger Säure; Spuren von Gold; Salicylsäure in Nahrungsmitteln usw.

β) Kolorimetrie. Die meisten Bestimmungen, die im vorigen Abschnitt erwähnt sind, lassen sich auch kolorimetrisch mit häufig befriedigender Genauigkeit ausführen; besonders für technische Betriebe, in denen zahlreiche analoge Bestimmungen ausgeführt werden müssen, läßt sich meist eine besondere Einrichtung des Kolorimeters herstellen, welche recht genaue Resultate ermöglichen (vgl. auch den Artikel „Spektralanalyse").

Literatur. ***H. Kayser***, *Handbuch der Spektroskopie, Bd. 3, Leipzig 1905.* — ***H. Ley***, *Die Beziehungen zwischen Farbe und Konstitution bei organischen Verbindungen unter Berücksichtigung der Untersuchungsmethoden, Leipzig 1911.* — ***E. C. C. Baly***, *Spektroscopy, London 1905. Uebersetzung Baly-Wachsmuth, Spektroskopie, Berlin 1908.* — ***E. Baur***, *Kurzer Abriß der Spektroskopie und Kolorimetrie, Leipzig 1907.* — ***H. und A. Krüss***, *Kolorimetrie und quantitative Spektralanalyse in ihrer Anwendung in der Chemie, Hamburg und Leipzig 1909.* — ***H. W. Vogel***, *Spektralanalyse irdischer Stoffe, Berlin 1898.* — ***Ostwald-Luther***, *Physikochemische Messungen, Leipzig 1909.* — ***J. Formánek***, *Untersuchung und Nachweis organischer Farbstoffe auf spektroskopischem Wege, Berlin 1908.* — ***R. Nietzki***, *Chemie der organischen Farbstoffe, Berlin 1901.* — ***G. Rudorf***, *Die Lichtabsorption in Lösungen vom Standpunkte der*

Dissociationstheorie, Stuttgart 1904. — ***H. Kauffmann,*** *Ueber den Zusammenhang zwischen Farbe und Konstitution bei chemischen Verbindungen, Stuttgart 1910.* — ***Derselbe,*** *Die Auxochrome, Stuttgart 1910.* — ***F. Henrich,*** *Neuere theoretische Anschauungen auf dem Gebiete der organischen Chemie, Braunschweig 1908.* — ***A. Werner,*** *Neuere Anschauungen auf dem Gebiete der anorganischen Chemie, Braunschweig 1910.*

K. Schaefer.

Acanthocephala.

Eine Abteilung der Würmer, welche gewöhnlich zu den Nemathelminthen gestellt wird und in diesem Handbuch dort behandelt werden soll (vgl. d n Artikel „Nemathelminthes").

Acephala.

Gewöhnlich als Blattkiemer oder Muscheln bezeichnete Abteilung der Weichtiere (vgl. den Artikel „Lamellibranchiata").

Acrania.

Leptocardia oder Röhrenherzen. Die niederste Abteilung der Wirbeltiere, als deren Vorläufer sie vielfach betrachtet werden (vgl. den Artikel „Amphioxus").

Adanson
Michel.

Botaniker. Geboren am 7. April 1727 zu Aix in der Provence, kam in früher Kindheit nach Paris und studierte dort unter Réaumur und B. de Jussieu. 1748 besuchte er als Angestellter der Compagnie d'Afrique den Senegal und verweilte dort, eine große Menge Tiere und Pflanzen beschreibend, fünf Jahre. Von seiner Histoire naturelle du Sénégal, die 8 Bände umfassen sollte, erschien nur der erste (Paris 1757), der die Reisebeschreibung und die Bearbeitung der Conchylien enthält und ihm die Mitgliedschaft der Akademie eintrug. 1763 erschienen seine Familles des plantes (Paris) in 2 Bänden, die einzelne Fortschritte in der Gruppierung und Trennung gewisser Familien brachten (z. B. der Campanulaceen, Thymelaeaceen usw.), im ganzen aber einen mißglückten Versuch darstellen. 1774 legte er der Pariser Akademie den Plan zu einer umfassenden naturwissenschaftlichen Enzyklopädie vor, die er allein bearbeiten wollte; das Werk kam nicht zustande, obwohl er sein ganzes späteres Leben daran in vollkommener Zurückgezogenheit arbeitete. Aus seinen meist in den Mémoires de l'Académie veröffentlichten kleineren Mitteilungen sind die Entdeckung des später nach ihm benannten Affenbrotbaumes (1759), der Bewegungen der Oscillarien (1767) und der Elektrizität des Zitterwelses, deren Wirkung er mit einer Leydener Flasche verglich, anzuführen. Er starb zu Paris am 3. August 1806.

Literatur. ***Cuvier,*** *Recueil des éloges historiques I 1819 S. 267.*

W. Ruhland.

Adsorption.

1. Allgemeine Erläuterung des Begriffs Adsorption. 2. Die Adsorption von Gasen. 3. Definition der Adsorption. 4. Die Adsorption in Lösungen. 5. Erklärung der Adsorption. 6. Bedeutung der Adsorption für andere physikalisch-chemische Erscheinungen: a) Herstellung hoher Vakua. b) Chemische Kinetik. c) Kolloidchemie. d) Mineralogie. 7. Bedeutung der Adsorption für die Technik. 8. Bedeutung der Adsorption für Physiologie und Biologie.

1. Allgemeine Erläuterung des Begriffs Adsorption. Die Erscheinungen, die zur Bildung des Begriffs der Adsorption — einige Autoren benutzen auch hierfür das Wort Absorption — führten, sind folgende: Bringt man einen festen Stoff, der sehr fein verteilt oder sehr porös ist, z. B. Kohle, Kaolin, Meerschaum u. a. m., in ein Gas oder in eine Lösung, so beobachtet man oft, daß der Druck des Gases oder die Konzentration der Lösung abnimmt; die verschwundenen Stoffmengen sind locker an den festen Stoff gebunden und lassen sich meist leicht durch Auspumpen oder Auswaschen von ihm entfernen. Man brachte diese lockere Bindung früher in Zusammenhang mit der sogenannten Adhäsion und kam so dazu, den besonderen Begriff der Adsorption zu bilden. Erst ein genaueres Eingehen auf diese Erscheinungen führte zu einer schärferen Fassung des Begriffs.

Es wird im folgenden zunächst die Adsorption von Gasen und gelösten Stoffen beschrieben, dann die bisherigen Erklärungen der Adsorption erörtert und schließlich die Bedeutung der Adsorption für physikalisch-chemische, technische und biologische Prozesse besprochen.

2. Die Adsorption von Gasen. Will man die Adsorption eines Gases untersuchen, so glüht man zunächst den festen Stoff, das Adsorbens — meist ist Holzkohle verwandt worden — aus, um ihn von bereits adsorbierten Gasen zu befreien und bringt ihn dann in einen abgeschlossenen Gasraum. Man beobachtet an einem Manometer eine Druckabnahme, die zunächst meist rasch, in wenigen Sekunden oder Minuten, vor sich geht und nach einigen Stunden einen bestimmten Endzustand erreicht. Zu dem gleichen Enddruck gelangt man, wenn man von niedrigen Drucken ausgehend durch Zufuhr weiterer Gasmengen den Druck erhöht. Es handelt sich also um Gleichgewichte.

Charakteristisch für diese sind der **Gleichgewichtsdruck** und die **adsorbierte Menge**, die mit dem betreffenden Druck im Gleichgewicht steht; diese wird zweckmäßig in Molen oder Millimolen des betreffenden Gases pro Gramm Adsorbens berechnet: ist x die gesamte adsorbierte Substanzmenge, m die Menge des Adsorbens, so ist $a = \frac{x}{m}$ die adsorbierte Menge.

Ordnet man die adsorbierten Mengen a als Ordinaten den zugehörigen Gleichgewichtsdrucken p als Abszissen zu, so erhält man eine gegen die Abszissenachse gekrümmte Kurve, wie sie Figur 1 darstellt, d. h. die adsorbierten Mengen wachsen nicht proportional den Drucken, wie es bei einer



Fig. 1.

Verteilung nach dem **Henrysatz** (bei Lösung eines Gases in einer Flüssigkeit usw., vgl. den Artikel „**Lösungen**") der Fall ist, sondern sie sind bei niedrigen Drucken groß, und nehmen bei Drucksteigerung verhältnismäßig wenig zu. Bei einer Verteilung nach dem Henrysatz würde man die durch den Nullpunkt gehende Gerade erhalten. Analytisch läßt sich die gekrümmte Kurve durch eine Gleichung der Form

$$a = \alpha p^{\frac{1}{n}}$$

ausdrücken, die sogenannte **Adsorptionsisotherme**. Hier sind α und $\frac{1}{n}$ Konstanten die von der Temperatur und der Natur des Gases und des Adsorbens abhängen. Logarithmiert man die Adsorptionsisotherme, so ergibt sich

$$\lg a = \lg \alpha + \frac{1}{n} \lg p$$

d. h. die Gleichung einer geraden Linie. Gilt also die genannte Gleichung, so müssen die Werte von a und p in ein logarithmisches Diagramm eingetragen auf einer Geraden liegen. Der Abschnitt der Geraden auf der Ordinatenachse ist gleich $\lg \alpha$, der Tangens des Neigungswinkels dieser Geraden gleich $\frac{1}{n}$. Das α variiert stark von Gas zu Gas und Adsorbens zu Adsorbens, während die Werte von $\frac{1}{n}$ meist zwischen 0,2 und 1 liegen.

Die Adsorptionsisotherme dieser Form gilt nur für kleine Drucke. Bei höheren Drucken scheint regelmäßig die Neigung gegen die p-Achse zuzunehmen, d. h. auch die lg a-lg p-Gerade krümmt sich, und es dürfte schließlich (vielleicht unstetig) ein konstanter Wert des a erreicht werden. Wahrscheinlich hängt dies mit dem Verflüssigen des Gases zusammen, denn bei leicht kondensierbaren Gasen tritt dies Umbiegen bei kleineren Drucken schneller ein, als bei schwer kondensierbaren. Diese Verhältnisse sind noch nicht näher untersucht worden.

Die **Adsorptionsgeschwindigkeit** ist im allgemeinen groß, die Hauptmenge des Adsorbierten wird in wenigen Minuten aufgenommen. Nach den wenigen Versuchen, die vorliegen, scheint eine einfache logarithmische Abhängigkeit von der Zeit vorzuliegen, es gilt eine Beziehung

$$\frac{dx}{dz} = k (x_\infty - x)$$

hier ist x die in jedem Augenblick adsorbierte Menge, x_∞ die im Gleichgewicht adsorbierte Menge, z die Zeit, k eine Konstante.

Es muß nun bezüglich des Adsorptionsgleichgewichts noch folgendes bemerkt werden. Solange man in verhältnismäßig kurzen Zeiträumen (mehreren Stunden) die Versuche vornimmt, stellen sich die Gleichgewichte in der beschriebenen Weise umkehrbar ein. Man beobachtet nun oft in längeren Zeiten (Tagen, Wochen) eine weitere, langsame Abnahme des Druckes. Meist läßt sich dieser langsame Vorgang, der wahrscheinlich auf einer chemischen Reaktion oder der Bildung einer festen Lösung beruht, deutlich von dem anderen sondern. Man bezeichnet zweckmäßig nur den ersten raschen als Adsorption.

Der Einfluß, den die Natur des **Adsorbens** ausübt, ist nur wenig untersucht worden. Nach den bisherigen Erfahrungen scheint die Reihenfolge, in der die Gase adsorbiert werden, nur wenig vom Adsorbens abzuhängen.

Man kann daher von der größeren oder kleineren **Adsorbierbarkeit** eines

Gases sprechen. Diese hängt nun mit der Kondensierbarkeit zusammen: Gase wie Wasserstoff, Helium werden sehr wenig adsorbiert, Stickstoff, Sauerstoff, Kohlensäure, Ammoniak in dieser Folge zunehmend stärker, die Reihenfolge der α-Werte, die ein Maß für die Adsorbierbarkeiten sind, ist die gleiche wie die der kritischen Temperaturen. Ein zahlenmäßiger Zusammenhang zwischen ihnen ist bisher noch nicht gefunden worden.

Die Adsorption nimmt in allen untersuchten Fällen mit steigender Temperatur ab, und zwar nehmen die Werte der α in der Adsorptionsisotherme ab mit wachsender Temperatur, während der Wert des Exponenten $\frac{1}{n}$ zunimmt und dem Wert 1 sich nähert. Auch hier ist ein Zusammenhang mit den kritischen Eigenschaften der Gase unverkennbar: Gase mit niedriger kritischer Temperatur wie Wasserstoff haben bereits bei Zimmertemperatur einen Exponenten 1 (bei der Temperatur der flüssigen Luft ist der Exponent gebrochen); Gase mit höheren kritischen Temperaturen erreichen den Wert 1 erst bei viel höheren Temperaturen. Der zahlenmäßige Zusammenhang zwischen Druck, adsorbierter Menge und den Temperaturkoeffizienten des α und $\frac{1}{n}$ ist für kleine Drucke bekannt.

Da die Adsorption mit sinkender Temperatur begünstigt wird, so verlangt die Thermodynamik, daß sie unter Wärmeentwickelung vor sich geht. Dies ist der Fall. Man kann aus thermodynamischen Ueberlegungen eine Beziehung zwischen der Adsorptionswärme und den Temperaturkoeffizienten der charakteristischen Adsorptionskonstanten α und $\frac{1}{n}$ ableiten, die sich gut bestätigt hat.

Bei der Adsorption von Dämpfen in der Nähe der Sättigung befindet man sich in dem Druckbereich, wo die Adsorptionsisotherme nicht gilt. Hier treten ferner noch insofern Verwicklungen ein, als es darauf ankommt, ob das Adsorbens benetzt wird oder nicht.

3. Definition der Adsorption. Als Kennzeichen der Adsorption kann man folgende ansehen: die Gültigkeit der Adsorptionsisotherme; die rasche Einstellung des Gleichgewichts; die Abnahme der aufgenommenen Menge mit steigender Temperatur; eventuell noch: die geringe Abhängigkeit von der Natur des festen Stoffes und der Zusammenhang mit den kritischen Eigenschaften der Gase. Es ist zu bemerken, daß die Aufnahme von Gasen durch Metalle, z. B. die des Wasserstoffs durch Palladium und Platin im allgemeinen nicht einer Adsorption entspricht.

4. Die Adsorption in Lösungen. Die Adsorption in Lösungen gleicht weitgehend der Adsorption der Gase. Auch hier gilt für verdünnte Lösungen die Adsorptionsisotherme $a = \alpha c^{\frac{1}{n}}$, wo c die Gleichgewichtskonzentration ist. Mit wachsender Konzentration scheint auch hier regelmäßig, vielleicht unstetig, ein bestimmter Grenzwert der adsorbierten Menge erreicht zu werden, der sich weiter mit steigender Konzentration nicht mehr ändert. Auch hier stellt sich das Gleichgewicht schnell ein. Auch hier ist in den meisten, bisher untersuchten Fällen die Reihenfolge, in der die gelösten Stoffe von verschiedenen Adsorbentien adsorbiert werden, von der Natur des Adsorbens nur wenig abhängig; allerdings sind ausgesprochene Abweichungen von dieser Regel mehrfach bekannt.

Die Abhängigkeit von der Natur des gelösten Stoffes ist hier natürlich viel verwickelter als die Abhängigkeit von der Natur des Gases, weil ja der Einfluß des Lösungsmittels mit in Frage kommt. Für die vor allem untersuchte Adsorption in wässeriger Lösung gilt folgendes: sehr wenig absorbiert werden anorganische Salze, Säuren und Basen, ferner stark hydroxylhaltige organische Stoffe, wie Zucker u. dgl.; merklich stärker Salze mit organischem Kation und Anion, noch stärker aliphatische Säuren und Basen und sehr stark aromatische Stoffe: Säuren, Basen, Phenole, Farb- und Gerbstoffe, ferner auch die Halogene, Chlor, Brom, Jod. In vielen Fällen scheint deutlich eine Beziehung zu bestehen zwischen der Adsorbierbarkeit gelöster Stoffe und ihrer Fähigkeit, die Kompressibilität des Lösungsmittels zu erhöhen und die Oberflächenspannung zu erniedrigen. Die Elektrolyte sind einfach mit aufgeführt, weil sie sich in vielen Beziehungen nicht von den Nichtelektrolyten unterscheiden: es gilt die Adsorptionsisotherme, das Adsorbens tritt bezüglich seines Einflusses zurück, organische Verbindungen werden stärker adsorbiert u. a. m. In anderer Beziehung unterscheiden sie sich allerdings unverkennbar, so daß man gewisse elektrische Einflüsse mit in Rechnung ziehen muß. Hierauf wird noch kurz eingegangen.

Beim Vergleich der Adsorption in verschiedenen Lösungsmitteln drängt sich folgende Regelmäßigkeit auf: Stoffe, die in anderen gelöst, stark adsorbiert werden, benachteiligen die Adsorption, wenn sie selbst Lösungsmittel sind, umgekehrt begünstigen sie diese, wenn sie gelöst schwach adsorbiert werden. Deshalb wird in organischen Lösungsmitteln viel schwächer adsorbiert als in Wasser, während z. B. in konzentrierter Schwefelsäure gleichfalls starke Adsorption statthat.

Werden mehrere Stoffe aus einer Lösung durch ein Adsorbens adsorbiert, so werden sie alle adsorbiert, aber das stärker adsorbierbare verdrängt in ausgesprochenem Maße das weniger stark absorbierbare.

Dies gilt für Nichtelektrolyte und schwache Elektrolyte. Ein starker Elektrolyt wird nicht nach dieser Regel von einem Nichtelektrolyten verdrängt; er bleibt vielmehr, selbst wenn sehr schwach adsorbierbar, etwa zum gleichen Betrag adsorbiert, daneben wird der stark adsorbierte Stoff stark adsorbiert. Dagegen vermag ein zweiter starker Elektrolyt den ersten von dem Adsorbens zu verdrängen.

Ein zweiter Unterschied zwischen Elektrolyten und Nichtelektrolyten besteht darin, daß Wasserstoff- und Hydroxylion auf die Adsorption der Ionen anderer Salze einen auffallenden Einfluß ausüben. Während in einer reinen Salzlösung beide Ionen in äquivalenter Menge adsorbiert werden, wird in Gegenwart von Wasserstoffion wesentlich nur neben diesem noch Anion mit adsorbiert, das Kation bleibt zum großen Teil in der Lösung; bei Gegenwart von Hydroxylion wird umgekehrt vor allem nur noch Kation adsorbiert, das andere Anion bleibt in Lösung. Wasserstoffion begünstigt also die Adsorption von Anionen, benachteiligt die der Kationen; Hydroxylion wirkt im Gegensinn. Ob durch verschieden starke Adsorption zweier Ionen ein Adsorptionspotentialsprung entstehen kann, ähnlich wie durch die verschiedene Beweglichkeit zweier Ionen ein Flüssigkeitspotentialsprung, bedarf noch der Aufklärung. Für die Adsorption mehrerer Gase untereinander wird wohl das gleiche gelten wie für die Adsorption mehrerer Nichtelektrolyte; sie ist noch nicht näher untersucht worden.

Der Einfluß der Temperatur ist gleichfalls bei der Adsorption in Lösungen verwickelter als bei der der Gase. Wohl nimmt auch hier die Adsorption mit steigender Temperatur meist ab und zwar nach der gleichen Gesetzmäßigkeit wie bei Gasen, es sind aber ferner Fälle bekannt, bei denen die Adsorption mit steigender Temperatur zunimmt, ohne daß man in diesen Fällen Grund hätte neue Faktoren mit in Rechnung zu ziehen. Auch die Adsorptionswärme in einer Lösung hat einen verwickelteren Sinn. Sie ist gleich dem Unterschied der Benetzungswärme des reinen Lösungsmittels und der der Lösung. Die Benetzungswärme des reinen Lösungsmittels ist nichts anderes als die Adsorptionswärme seines gesättigten Dampfes. Messungen auf diesem Gebiet liegen nur in sehr kleinem Umfang vor.

Man mißt die Adsorption in Lösungen zweckmäßig in der Weise, daß man das fein verteilte Adsorbens mit der Lösung bekannten Gehalts bis zum Gleichgewicht schüttelt und dann den Gehalt von neuem bestimmt. Suspendierte Reste des Adsorbens entfernt man durch Filtrieren oder besser noch durch Zentrifugieren.

Bisher war nur von der Adsorption durch feste Stoffe die Rede. Es tritt nun eine ganz ähnliche Abnahme der Konzentration einer Lösung ein, wenn man ein Gas oder eine zweite, wenig mischbare Flüssigkeit fein verteilt durchtreten läßt. So ist nachgewiesen worden, daß, wenn man eine wässerige Lösung von Amylalkohol oder Saponin reichlich zum Schäumen gebracht hat, der abgehobene Schaum mehr vom gelösten Stoff enthält als die Lösung in Masse, ferner daß, wenn man Petroleum in feinen Tropfen durch Lösungen von Stoffen wie Kaffein, Methylorange u. a. treten läßt, die in Petroleum durchaus unlöslich sind, die Konzentration der Lösung dennoch kleiner wird. Aehnliche Versuche sind mit fein verteiltem Quecksilber ausgeführt worden. Ob in diesen Fällen auch die quantitativen Kennzeichen der Adsorption zutreffen, ist noch nicht endgültig festgestellt worden.

5. Erklärung der Adsorption. Während die Adsorption als physikalisch-chemische Erscheinung gut charakterisiert ist, und man selten im Zweifel sein wird, ob ein bestimmter Vorgang als Adsorption anzusehen ist oder nicht, herrscht noch große Meinungsverschiedenheit darüber, wie sie zu erklären ist, d. h. mit welchen anderen Phänomenen sie zusammenhängt. Drei Anschauungen sind da vor allem zu unterscheiden: die eine faßt die Adsorption als chemischen Vorgang auf, die zweite als Lösungsvorgang und die dritte als Oberflächenverdichtung.

Betrachtet man das Adsorptionsgleichgewicht als chemisches Gleichgewicht, so muß sich die Adsorptionsisotherme als Ausdruck des Massenwirkungsgesetzes deuten lassen. Wenn man das Adsorbens und die Verbindung von Absorbens und adsorbiertem Stoff als feste Phasen mit konstanter Konzentration in das Massenwirkungsgesetz einführt, so gelangt man nicht zur Adsorptionsisotherme. Man muß in dem Komplex von Adsorbens und adsorbiertem Stoff jedenfalls eine Phase von variabler Zusammensetzung, also etwa eine feste Lösung annehmen, um einen Ausdruck von der Form der Adsorptionsisotherme zu erhalten. Formal läßt sich aber unter dieser Voraussetzung das Adsorptionsgleichgewicht ohne weiteres als chemisches Gleichgewicht auffassen.

Die Gegner dieser Anschauung bringen folgendes vor: die chemischen Gleichgewichte sind außerordentlich spezifisch, die Gleichgewichtskonstanten, die Reaktionsgeschwin-

digkeitskonstanten wie die Zahl der reagierenden Molekeln (in der Adsorptionsisotherme bedingt diese den Wert des Exponenten $\frac{1}{n}$) unterscheiden sich sehr von Fall zu Fall. Die Adsorptionsgleichgewichte sind dagegen auffallend wenig spezifisch; die Konstanten a (sie entsprechen den Gleichgewichtskonstanten im Massenwirkungsgesetz) unterscheiden sich für große Gruppen von Stoffen nur wenig voneinander, der Adsorptionsexponent $\frac{1}{n}$ hat unter den verschiedensten Bedingungen nur wenig variierende Werte, das gleiche gilt für die Geschwindigkeit, mit der sich das Gleichgewicht einstellt. Es ist weiter schwer zu verstehen, daß zwischen der Adsorbierbarkeit der Gase und ihrer Kondensierbarkeit ein enger Zusammenhang besteht, ebenso zwischen der Absorbierbarkeit gelöster Stoffe und dem Einfluß, den sie auf die Kompressibilität und Oberflächenspannung des Lösungsmittels ausüben. Schließlich ist nicht einleuchtend, daß Stoffe wie Argon und Helium adsorbiert werden, von denen keine chemische Verbindung bekannt ist. Anhänger der chemischen Theorie sind vor allem van Bemmelen, Duclaux, Robertson.

Die Adsorption als Lösungsvorgang wird nur von wenigen vertreten. Eine feste Lösung des absorbierten Stoffes im Adsorbens ist überaus unwahrscheinlich. Dem widerspricht einmal die Schnelligkeit, mit der sich das Gleichgewicht einstellt, da ja doch die Diffusison in festen Stoffen sehr langsam ist. Ferner müßte man, um den Unterschied zwischen der Adsorptionsisotherme und dem Henrysatz zu erklären, annehmen, daß der adsorbierte Stoff im Adsorbens dissoziiert ist unter Umständen in drei bis vier Bruchteile; dies ist aber in fast allen Fällen sehr unwahrscheinlich.

Neuerdings ist gelegentlich die Anschauung entwickelt worden, daß bei der Adsorption von Gasen das Gas an der Oberfläche des Adsorbens verflüssigt wird und daß in dieser Flüssigkeitshaut das Absorbens sich auflöst. Die Gestalt der Adsorptionsisotherme läßt sich dann unter gewissen Voraussetzungen erklären. Allerdings hält es schwer, diese Erklärungsweise auf die Adsorption in Lösungen zu übertragen. Die Vertreter dieser Anschauung verzichten auch darauf. Bei der, man kann sagen, völligen Uebereinstimmung zwischen der Adsorption von Gasen und der in Lösungen ist dies aber sicher nicht zweckmäßig.

Von sehr vielen wird die Ansicht vertreten, daß die Adsorption eine Oberflächenverdichtung ist; es seien nur Wilhelm und Wolfgang Ostwald, Freundlich, Michaelis, Donnan genannt. Aus thermodynamischen Ueberlegungen ergibt sich mit Notwendigkeit, daß an der Grenzfläche einer Flüssigkeit und eines festen Stoffes und einem Gase oder einer Lösung die Dichte oder die Konzentration anders sein muß wie im Gasraum oder in der Lösung. Wenn die Gasgesetze und die van't Hoffschen Gesetze für verdünnte Lösungen (vgl. die Artikel „Lösungen" und „Osmotische Theorie") gelten, ergibt sich eine Gleichung

$$u = -\frac{c}{RT}\frac{d\sigma}{dc}$$

Hier ist u der Ueberschuß des Gases oder gelösten Stoffes an der Grenzfläche über die normal dort vorhandene Menge pro Oberflächeneinheit gerechnet; c ist die Konzentration (bei Gasen der Druck); σ die Grenzflächenspannung; R die Gaskonstante; T die absolute Temperatur. Fraglich ist nur, ob das, was man als Adsorption bezeichnet, die durch diese Gesetzmäßigkeit beherrschte Erscheinung ist, oder ob sich über diese notwendig vorhandene Oberflächenverdichtung noch andere, etwa chemische Gleichgewichte lagern, die man unter den Begriff der Adsorption faßt.

Die genannte Formel ist sehr schwer zu prüfen. Bei den festen Adsorbentien, für die eigentlich bisher nur der Begriff Adsorption geprägt wurde, gelingt es leicht, die adsorbierte Menge, also auch das u zu bestimmen; aber die Grenzflächenspannung σ gegen Gas und Lösungen ist bekanntlich für feste Stoffe nur in seltenen Fällen und mit großer Mühe und geringer Genauigkeit meßbar und somit auch der Differentialquotient $\frac{d\sigma}{dc}$. Versuche dieser Art sind daher noch nicht ausgeführt worden.

Umgekehrt liegen die Verhältnisse bei der Adsorption an der Grenzfläche flüssig-gasförmig oder flüssig-flüssig. Hier läßt sich die Grenzflächenspannung und ihre Abhängigkeit von der Konzentration leicht messen, nur mit beträchtlicher Mühe aber die Adsorption, weil man nur schwer eine große Grenzfläche bekannter Größe herstellen kann. Wohl ist, wie oben erwähnt, eine Konzentrationsabnahme in Lösungen nach dem Durchperlen von Oeltropfen beobachtet worden und in vielen Fällen stimmt die so aufgenommene Menge mit der aus dem $\frac{d\sigma}{dc}$ berechneten überein. Aber es fehlt der quantitative Nachweis, daß auf diese Stoffaufnahme die Kennzeichen der Adsorption passen.

Während also die Theorie der Oberflächenverdichtung noch nicht zahlenmäßig hat geprüft werden können, spricht qualitativ viel für ihre Richtigkeit. Nur folgendes sei aufgeführt: das $\frac{d\sigma}{dc}$ ist in weitaus den meisten

Fällen negativ; aus der thermodynamischen Gleichung folgt dann, daß das u d. h. die Adsorption positiv ist, wie ja auch am häufigsten gefunden wurde. Ja, wenn man für das $\frac{d\sigma}{dc}$ den Ausdruck einsetzt, der sich aus der empirisch gefundenen Beziehung von σ zu c ergibt, so erhält man die Adsorptionsisotherme. Ferner läßt sich der enge Zusammenhang zwischen Adsorbierbarkeit und Kondensierbarkeit und der Veränderung der Kompressibilität und Oberflächenspannung leicht erklären.

Es kann als sicher gelten, daß auch der elektrische Zustand der Grenzfläche bei einer Stoffaufnahme an ihr eine wichtige Rolle spielt, vor allem bei der Adsorption der starken Elektrolyte. Zurzeit kann man die oben aufgeführten Kennzeichen, durch die sich deren Adsorption von der der Nichtelektrolyte unterscheidet, nicht völlig erklären; es läßt sich daher noch nicht eine etwaige elektrische Adsorption von der vor allem behandelten gewöhnlichen mechanischen (oder chemischen) unterscheiden.

6. Bedeutung der Adsorption für andere physikalisch-chemische Erscheinungen. In einer großen Anzahl von Gebieten spielt die Adsorption eine Rolle, vor allem überall dort, wo große Grenzflächen vorkommen.

6a) Herstellung hoher Vakua. Mit Hilfe der Gasadsorption gelingt es, sehr hohe Vakua zu erzeugen. Es beruht dies darauf, daß die Adsorption mit sinkender Temperatur stark zunimmt. Bringt man ausgeglühte Holzkohle (Kokosnußkohle) in einen evakuierten Raum und kühlt sie auf sehr tiefe Temperatur (mit flüssiger Luft oder flüssigem Wasserstoff) ab, so werden die letzten Gasreste weitgehend entfernt. Man kann auch so die schwer adsorbierbaren Gase wie Helium, Wasserstoff usw. leicht von den besser adsorbierbaren Sauerstoff, Stickstoff u. a. trennen.

6b) Chemische Kinetik. In der chemischen Kinetik ist die Adsorption häufig von großer Bedeutung. Viele Gasreaktionen werden an festen Oberflächen stark beschleunigt oder in anderer Weise beeinflußt. Es ist in vielen Fällen, z. B. bei dem Zerfall des Antimonwasserstoffs, bei der Bildung des Schwefeltrioxyds aus Schwefeldioxyd und Sauerstoff, gelungen, den überaus verwickelten Reaktionsvorgang mit Hilfe der Adsorption quantitativ zu erklären. Diese kann in sehr mannigfacher Weise von Einfluß sein: Werden die Ausgangsstoffe adsorbiert, so bedingt die Konzentrationserhöhung an der Grenzfläche eine Reaktionsbeschleunigung; werden die Endprodukte adsorbiert, so bilden sich oft Schichten, die die Reaktion hemmen, sie „vergiften".

6c) Kolloidchemie. Daß man in der Kolloidchemie die Adsorption sehr oft berücksichtigen muß, ist leicht einzusehen, da man es dort mit Gebilden von großer Grenzflächenentwicklung zu tun hat. Nur einige Beispiele. Bei der Fällung der sogenannten Suspensionskolloide durch Elektrolyte tritt eine Adsorption des Elektrolyten ein und demgemäß hängt die eigentümliche Abhängigkeit der fällenden Wirkung von der Konzentration des Elektrolyten mit der Adsorbierbarkeit seiner Ionen zusammen. Da diese fällende Wirkung ihrerseits in enger Beziehung zu der Beeinflussung der Kataphorese und Elektroendosmose (vgl. den Artikel „Elektroosmose") durch Elektrolyte steht, so kommt auch hier die Adsorption als wesentlich in Betracht. Auch der stabilisierende Einfluß vieler Stoffe wie Gelatine, Eiweiß, Dextrin usw. auf Suspensionskolloide beruht vor allem darauf, daß sie an den suspendierten Teilchen adsorbiert werden. Ferner muß man bei der katalytischen Wirkung vieler Metallsole die Adsorption berücksichtigen; vor allem beruht der vergiftende Einfluß von Cyankalium, Sublimat u. a. auf die Zersetzung des Wasserstoffperoxyds durch Metallsole sicher in ihren ersten Stadien auf einer Adsorption (vgl. auch den Artikel „Disperse Gebilde").

6d) Mineralogie. Neuerdings hat sich herausgestellt, daß man in der Mineralogie häufig mit Erfolg auf die Adsorption zur Erklärung verschiedener Erscheinungen zurückgehen muß. Der Einfluß gelöster Stoffe auf die Kristallform und die Wachstumsgeschwindigkeit von Kristallen, ferner auch der Einfluß gelöster Stoffe auf die Kristallisationsgeschwindigkeit von Schmelzen wird zum großen Teil durch ihre Adsorption an den Kristallflächen verursacht.

7. Bedeutung der Adsorption für die Technik. Wenn in technischen Fragen die Adsorption oft zu berücksichtigen ist, so kommt das besonders daher, daß man es dort so häufig mit kolloiden Gebilden zu tun hat. Es darf als sicher gelten, daß beim Färben und Gerben in weitaus den meisten Fällen die Aufnahme des Farb- oder Gerbstoffes als eine Adsorption zu bezeichnen ist. Damit soll nicht gesagt sein, daß andere Vorgänge (Lösung; chemische Bindung im gewöhnlichen Sinn) nicht von Bedeutung sind, sie treten vielmehr nachträglich häufig unzweifelhaft ein; aber in den ersten, zeitlichen Stadien liegt meist unbedingt eine Adsorption vor.

Bei der Abwässerreinigung handelt es sich oft um die Fällung einer kolloiden Lösung durch Elektrolyte; diese hängt eng mit der Adsorption zusammen. In der Agrikulturchemie spielt sie eine wichtige Rolle, da das Zurückhalten gelöster Stoffe in der Bodenkrume häufig auf ihr beruht. Die Geruchs- und Geschmacks-

stoffe sind z. B. im Bier vor allem an kolloid suspendierten Teilchen adsorbiert; dies ist nur ein Punkt, der die Adsorption in der Technik des Brauwesens berücksichtigen heißt. Die Bromsilberteilchen der photographischen Platte bilden eine große Grenzfläche, deren Fähigkeit zu adsorbieren z. B. für die Sensibilisierung, aber auch wohl für viele andere Erscheinugen von maßgebender Bedeutung ist. Dies sind nur einige herausgegriffene Beispiele.

8. Bedeutung der Adsorption für Physiologie und Biologie. Die organisierte Materie zeichnet sich bekanntlich durch ihre ungeheure Grenzflächenentwicklung aus: man hat einmal die große Fläche der Zellwände und ferner das Protoplasma, das außer kolloiden Lösungen noch andere Grenzflächen enthält. Es ist daher zu erwarten, daß man zur Erklärung vieler physiologischer und biologischer Vorgänge die Adsorption hinzuziehen muß. Allerdings sind diese Vorgänge meist so verwickelt, es greifen so viele Prozesse verschiedener Art ineinander, daß es zurzeit noch sehr schwer hält, die Rolle der Adsorption sauber herauszuschälen. Man kann daher eben nur Beispiele anführen, bei denen die Adsorption mit großer Wahrscheinlichkeit in irgendeiner Phase des Vorganges eine wichtige Rolle spielt. Derartige Fälle sind: viele Enzymreaktionen; die Agglutination; die Bindung von Toxin und Antitoxin; die Desinfektion; die künstliche Befruchtung; die Beeinflussung des Wachstums von Bakterien; das Entstehen von Geißelzöpfen.

Literatur: ***Müller***, *Allgemeine Chemie der Kolloide, Leipzig 1907.* — ***Ostwald***, *Grundriß der Kolloidchemie, 1. Aufl., Dresden 1909.* — ***Derselbe***, *Grundriß der Kolloidchemie, 2. Aufl., 1. Hälfte, Dresden 1911.* — ***H. Freundlich***, *Kapillarchemie, Leipzig 1909.* — ***J. M. van Bemmelen***, *Die Absorption. Gesammelte Abhandlungen über Kolloide und Absorption, Dresden 1910.*

H. Freundlich.

Aepinus
Ulrich Theodor.

Geboren am 13. Dezember 1724 in Rostock; gestorben am 10. August 1802 in Dorpat, ein Nachkomme des in der Reformationszeit bekannten Theologen John Aepinus. Er war der Sohn eines Pfarrers, wurde Privatdozent und Professor in Berlin, lebte 1757 bis 1758 in Petersburg als Mitglied der Akademie der Wissenschaften. Aepinus führte in die Elektrizitätslehre den Begriff der unmittelbaren Fernwirkung ein. 1756 veröffentlichte er seine in Gemeinschaft mit Wilke angestellten Versuche über Pyroelektrizität. Sein Hauptwerk Tentamen theoriae electricitatis et magnetismi (Petersburg 1759) war seinerzeit epochemachend für die Lehre von Elektrizität und Magnetismus.

E. Drude.

Aequivalent.

1. Begriff und Ableitung. Die Aufstellung des Begriffs Aequivalent geschah im Anschluß an die Entdeckung eines allgemein gültigen Gesetzes, das die Bildung und Zersetzung der chemischen Verbindungen regelt (Gesetz der konstanten und multiplen Proportionen. Vgl. den Artikel „Atomlehre“). Dieser von Wollaston (1808) eingeführte Begriff sollte unabhängig von jeder Spekulation im Sinne der Daltonschen Atomhypothese lediglich der Messung direkt zugängliche Größen enthalten. Unter dem Aequivalent eines Grundstoffs versteht man die Gewichtsmenge, die einen Gewichtsteil Wasserstoff in einer chemischen Verbindung ersetzen kann. Es möge kurz die Ableitung der Aequivalente oder Aequivalentgewichte einiger Grundstoffe skizziert werden: Das oben angedeutete Gesetz der konstanten Proportionen besagt, daß die Vereinigung verschiedener Grundstoffe zu chemischen Verbindungen nicht nach beliebigen, sondern stets nach bestimmten, unter allen Umständen konstanten Gewichtsverhältnissen erfolgt, die man nach Kenntnis der Zusammensetzung der Verbindungen ermitteln kann.

Die Analyse der Wasserstoffverbindungen des Chlors, Broms, Sauerstoffs und Schwefels hat z. B. folgende Resultate ergeben

Chlorwasserstoff		Bromwasserstoff	
Chlor	97,3	Brom	98,8
Wasserstoff	2,7	Wasserstoff	1,2
	100,0		100,0

Wasser		Schwefelwasserstoff	
Sauerstoff	88,9	Schwefel	94,1
Wasserstoff	11,1	Wasserstoff	5,9
	100,0		100,0

Berechnet man, welche Mengen der genannten vier Grundstoffe mit einem Gewichtsteil Wasserstoff verbunden sind, der in diesen, wie in allen anderen Fällen in kleinster Menge in den Verbindungen enthalten ist, so erhält man folgende Tabelle

Chlor	35,5	Brom	80
Wasserstoff	1	Wasserstoff	1
Sauerstoff	8	Schwefel	16
Wasserstoff	1	Wasserstoff	1

Ferner resultiert aus der Analyse des Chlornatriums, daß mit der oben gefundenen Menge Chlor, nämlich 35,5 Gewichtsteile, 23 Gewichtsteile Natrium verbunden sind. Schließlich läßt sich aus der Zusammensetzung der Verbindungen des Natriums mit Brom, Sauerstoff und Schwefel das zunächst

überraschende Resultat ableiten, daß mit 23 Gewichtsteilen Natrium 85,5 Gewichtsteile Brom, 8 Gewichtsteile Sauerstof, 16 Gewichtsteile Schwefel verbunden sind, d. h. dieselben Mengen, die sich mit einem Gewichtsteil Wasserstoff chemisch vereinigen. Die obigen Zahlen, 1; 35,5; 80; 8; 16 sind Konstanten für diese Grundstoffe und werden Aequivalente oder Aequivalentgewichte (Verbindungsgewichte, stöchiometrische Quantitäten) genannt. Dieselben Zahlen (oder Vielfache davon) kehren bei allen anderen Verbindungen der Grundstoffe wieder. Wie die Atomgewichte sind die Aequivalente relative Zahlen, die auf Wasserstoff als Einheit bezogen sind.

2. Aequivalent und Wertigkeit. Vor der Begründung der modernen Atomtheorie sind die Begriffe Atom- und Aequivalentgewicht häufig verwechselt worden. Erst als mit dem weiteren Ausbau der Atomtheorie auf Grund des Avogadroschen Gesetzes der Molekülbegriff aufgestellt und weiter der Begriff der Wertigkeit oder Valenz geschaffen wurde, war eine scharfe Definition möglich (s. den Artikel „Atomlehre"). Wir verstehen unter Aequivalent resp. Aequivalentgewicht eines Grundstoffs das Atomgewicht dividiert durch seine Valenz; bei einwertigen Elementen ist somit das Aequivalent gleich dem Atomgewicht, bei zweiwertigen gleich der Hälfte desselben usw; näheres siehe Artikel „Valenz".

In der folgenden kleinen Tabelle sind die Beziehungen zwischen Aequivalent- und Atomgewicht bei einigen Elementen dargestellt:

Element	Atomgewicht	Valenz	Aequivalent
Na	23	1	23
K	39	1	39
Cl	35,5	1	35,5
O	16	2	8
S	32	2	16
N	14	3	4,66

Kommen Elementen, z. B. Metallen, mehrere Wertigkeits-(Oxydations-)stufen zu, so sind natürlich auch verschiedene Aequivalente zu unterscheiden. Folgende Tabelle gibt einige Beispiele:

		Wertigkeit	Aequivalent
Eisen	Atomgewicht 59		
	Ferroverbindungen $Fe\chi_2$	2	$\frac{Fe}{2} = 29,5$
	Ferriverbindungen $Fe\chi_3$	3	$\frac{Fe}{3} = 19,7$
Kupfer	Atomgewicht 63,6		
	Cuproverbindungen $Cu\chi$	1	$Cu = 63,6$
	Cupriverbindungen $Cu\chi_2$	2	$\frac{Cu}{2} = 31,8$
Quecksilber	Atomgewicht 200		
	Mercuroverbindungen $Hg_2\chi_2$	2	$\frac{Hg_2}{2} = 200$
	Mercuriverbindungen $Hg\chi_2$	2	$\frac{Hg}{2} = 100$

3. Aequivalenz. Atome, die eine gleiche Zahl von Affinitätseinheiten (Valenzeinheiten) betätigen, werden äquivalent genannt, so sind z. B. Na und K, O und S, N und P untereinander äquivalent; die gleiche Bezeichnungsweise ist auch für Radikale üblich.

(OH) (SH) NH_2 (CH$_3$) (C_2H_5) (C_3H_7) } einwertige Radikale

(CH_2) C_2H_4) (C_3H_6) zweiwertige Radikale.

Schließlich bezeichnet man, einem Brauch in der Maßanalyse folgend, als Aequivalente von Säuren, Basen und Salzen diejenigen Mengen dieser Stoffe, die durch das Molekulargewicht (Mol) dividiert durch die Basicität resp. Acidität oder die Wertigkeit des Metalls (bei Salzen) angegeben werden. So beträgt das Aequivalent

$$\text{des } Li(OH): \frac{24}{1} = 24$$

$$\text{der } H_2SO_4: \frac{98}{2} = 49$$

$$\text{des } Fe_2(SO_4)_3: \frac{400}{6} = 66,6$$

Vgl. hierzu den Abschnitt „Maßanalyse" in dem Artikel „Chemische Analyse".

4. Bestimmung des Aequivalentgewichts. Man hat der Definition entsprechend die Menge des Stoffs zu ermitteln, die einem Gewichtsteil Wasserstoff gleichwertig ist. In der Mehrzahl der Fälle genügt es, zur Ermittelung des Aequivalents geeignete Verbindungen des Grundstoffs von möglichst einfacher und eindeutiger Zusammensetzung zu analysieren. Es mögen einige spezielle Fälle genannt werden.

1. Zur Bestimmung des Aequivalents der Metalle eignen sich häufig die Halogenverbindungen; man hat dann zu ermitteln, wieviel Gewichtsteile des Metalls mit 35,5 Gewichtsteilen Cl, 80 Gewichtsteilen Br usw. verbunden sind; so ist das Aequivalent des

Ra durch Analyse des Radiumbromids ermittelt worden.

2. Wenn das Metall Säuren unter Wasserstoffentwickelung zersetzt, so kann man das Aequivalent des Metalls durch direktes Messen des Wasserstoffvolumens feststellen, das man bei Anwendung einer bestimmten Menge des Metalls auf die im Ueberschuß vorhandene Säure erhält (Vorlesungsversuch von Lepsius zur Demonstration der Valenz der Metalle).

3. Bestimmung des Aequivalentgewichts auf elektrochemischem Wege (elektrochemische Aequivalente). Nach dem Faradayschen Gesetz scheidet ein und derselbe Strom in verschiedenen Elektrolyten solche Mengen ab, die im Verhältnis der chemischen Aequivalente stehen; ein g-Aequivalent eines Elektrolyten wird durch die Strommenge von ca. 96 500 Coul. zerlegt. Zur Bestimmung des Aequivalents eines Metalls läßt man z. B. den gleichen Strom durch die wässerige Lösung einer Säure und eines Salzes des zu untersuchenden Metalls gehen. Durch Vergleich der an den Kathoden ausgeschiedenen Mengen von Wasserstoff und Metall ergibt sich sofort das Aequivalent des letzteren (vgl. den Artikel „Elektrochemie").

In manchen Fällen genügt allerdings die bloße Analyse einer Verbindung zur Ermittelung des Aequivalentes eines Grundstoffs nicht, sondern es hat die Bestimmung der Molekulargröße der Verbindung sowie der Valenz des Grundstoffs zu erfolgen.

H. Ley.

Aether.

1. Allgemeines: a) Bildungsweisen; b) Physikalisches Verhalten; c) Chemische Eigenschaften. 2. Spezielle Aether: a) Aliphatische Aether: α) Aether der einwertigen Alkohole: 1. gesättigte Aether; 2. ungesättigte Aether. β) Aether der mehrwertigen Alkohole. Acetale. γ) Zyklische Aether. Alkylenoxyde. b) Aromatische Aether.

1. Allgemeines. Aether sind die Oxyde der Kohlenwasserstoffe. Sie enthalten zwei Kohlenwasserstoffradikale mit einem Sauerstoffatom verknüpft z. B. $C_2H_5-O-CH_3$ Aethyl-methyl-äther. Man kann sie als Anhydride der Alkohole betrachten, da sie durch Waseraustritt aus zwei Molekülen Alkohol entstehen

$$C_2H_5.OH + CH_3OH = C_2H_5\,O\,CH_3 + H_2O$$
Aethylalkohol, Methylalkohol, Aethylmethyläther.

Die Aether entsprechen den Metalloxyden der anorganischen Chemie, ebenso wie die Alkohole den Metallhydroxyden. Sie lassen sich als substituiertes Wasser ansehen, in dem die beiden Wasserstoffatome durch Kohlenwasserstoffreste ersetzt sind, während bei den Alkoholen nur ein Alkyl eingetreten ist

$H-O-H$ Wasser, $H-O-CH_3$ Alkohol, CH_3-O-CH_3 Aether.

Aether mit zwei gleichen Kohlenwasserstoffradikalen heißen „einfache" Aether, solche mit zwei verschiedenen Radikalen „gemischte" Aether. Sie sind isomer mit den Alkoholen gleicher Kohlenstoffzahl (Metamerie)

C_2H_6O: CH_3-CH_2-OH Aethylalkohol, CH_3-O-CH_3 Dimethyläther.

Die sogenannten „zusammengesetzten" Aether oder Ester sind Verbindungen von Alkoholen und Säuren unter Austritt von Wasser z. B. $CH_3.CO.OC_2H_5$ Essigsäureäthylester. Sie gehören nicht den eigentlichen Aethern an und werden deshalb am besten nur als Ester bezeichnet.

1 a) Bildungsweisen. 1. Durch Einwirkung von Natriumalkoholat auf Halogenalkyle entstehen einfache und gemischte Aether (Williamson 1851)

$$C_2H_5.ONa + C_2H_5Cl = C_2H_5-O-C_2H_5 + NaCl$$
$$C_2H_5.ONa + CH_3J = C_2H_5-O-CH_3 + NaJ$$

2. Halogenalkyle reagieren auch mit trocknen Metalloxyden, namentlich Silberoxyd unter Bildung von Aethern

$$2C_2H_5J + Ag_2O = C_2H_5-O-C_2H_5 + 2AgJ$$

3. Die wichtigste Bildungsweise, welche namentlich bei den niederen Homologen gute Dienste leistet, besteht in der Einwirkung von Schwefelsäure auf Alkohole. Diese Reaktion ist einer der am frühsten beobachteten (Val. Cordus 1540) und am besten studierten Vorgänge. Die Schwefelsäure wirkt nicht einfach als wasserentziehendes Mittel, sondern katalytisch. Williamson (1851) wies nach, daß die Reaktion in zwei Stadien verläuft: Zunächst vereinigen sich Alkohol und Schwefelsäure unter Wasseraustritt zur Alkylschwefelsäure, die dann mit einem zweiten Molekül Alkohol reagiert und dabei in Schwefelsäure und Aether zerfällt

$$\text{I. } C_2H_5.OH + HO.SO_3H = C_2H_5.O.SO_3H + H_2O$$
$$\text{II. } C_2H_5.O.SO_3H + C_2H_5OH = HO.SO_3H + C_2H_5.O.C_2H_5.$$

Verwendet man ein Gemisch zweier Alkohole bei dieser Reaktion, so erhält man drei Aether, zwei einfache und einen gemischten. Da die Schwefelsäure als Katalysator wirkt, so könnte man mit einer kleinen Menge dieser Säure unbegrenzte Mengen Alkohol in Aether überführen. In praxi erlischt jedoch die Wirksamkeit des Katalysators nach einiger Zeit, da einige Nebenreaktionen (Bildung von schwefliger Säure, Sulfonen und Sulfonsäuren) die Schwefelsäure allmählich verbrauchen. Ganz ähnlich wie die Schwefelsäure können auch andere Säuren

beim Aetherbildungsprozeß wirken: Phosphorsäure, Borsäure und namentlich Benzolsulfosäure bei höherer Temperatur. Auch mit Hilfe von Chlorzink, Eisenchlorid oder Kupfersulfat kann man Alkohole durch Wasserabspaltung in Aether überführen.

4. Aether lassen sich auch sehr bequem erhalten durch Einwirkung von Dialkylschwefelsäuren auf Alkoholate (oder Phenolate)

$$\underset{\text{Natriumphenolat}}{C_6H_5.ONa} + SO_2\!\begin{array}{l}\diagup O.CH_3\\ \diagdown O.CH_3\end{array}$$

$$= \underset{\text{Anisol}}{C_6H_5.O.CH_3} + SO_2\!\begin{array}{l}\diagup ONa\\ \diagdown O.CH_3\end{array}$$

5. Um aus einem Aether einen solchen mit längerer Kohlenstoffkette herzustellen, kann man sich der Magnesiumhalogenalkylverbindungen bedienen, nachdem man zuvor in dem Aether ein Wasserstoffatom durch ein Halogen substituiert hat

I. $C_5H_{11}.O.CH_3 \longrightarrow C_5H_{11}.O.CH_2Br$
Amyl-methyläther Brom-methyl-amyläther
II. $C_5H_{11}.O.CH_2Br + MgBr.C_2H_5 = C_5H_{11}.O.C_3H_7 + MgBr_2$
Amyl-propyläther.

1 b) Physikalische Eigenschaften. Die Aether sind neutrale, mit Wasser nicht mischbare Substanzen. Der „niedrigste" Aether (Dimethyläther) ist ein Gas, die nächsten Glieder sind Flüssigkeiten, die höchsten Homologen fest. Die Siedepunkte der einfachen Aether liegen immer erheblich tiefer, als die der entsprechenden Alkohole und zeigen in einer ansteigenden homologen Reihe für jede CH_2-Gruppe eine ziemlich regelmäßige Erhöhung:

	Sdp.	Differenz
Aethyl-methyläther	11°	
„ -Aethyläther	35°	24
„ -n-Propyläther	64°	29
„ -n-Butyläther	92°	28
„ -n-Amyläther (unbekannt)		22,5
„ -n-Hexyläther	137°	22,5
„ -n-Heptyläther	167°	30
„ -n-Octyläther	189°	22

Auch die Molekularvolumina wachsen ziemlich regelmäßig um etwa 22 für eine CH_2-Gruppe. Bei der Berechnung dieser Konstanten behält man für das Atomvolumen des ätherartig gebundenen Sauerstoffs den besonderen Wert 7,8 im Gegensatz zum Carbonyl-Sauerstoff, für den sich der Wert von 12,2 ergibt. Ganz ähnlich steigt die Molekularrefraktion in den homologen Reihen. Auch hier hat die Atomrefraktion für den ätherartig gebundenen Sauerstoff einen besonderen Wert, nämlich 1,683, während sich für Hydroxyl-Sauerstoff 1,521, für Carbonyl-Sauerstoff 2,287 ergibt. Die Aether zeigen normale Dampfdichte. Ihre Oberflächenspannung ist klein und immer kleiner als die der zugehörigen Alkohole. Der Temperaturkoeffizient der molekularen Oberflächenenergie hat sehr allgemein den normalen Wert 2,1, eine Tatsache, welche darauf deutet, daß die Aether keine assoziierten Flüssigkeiten sind im Gegensatz zu den Alkoholen und dem Wasser, deren Temperaturkoeffizienten 1,0 bis 1,6 resp. 0,9 bis 1,2 betragen. Die Fluidität der Aether ist groß und stets größer als bei den entsprechenden Alkoholen. Gleiche Verhältnisse zeigt die Kompressibilität. Die Dielektrizitätskonstante ist sehr klein, etwas größer zwar als die der Kohlenwasserstoffe, jedoch beträchtlich geringer als die der Alkohole und des Wassers. Dementsprechend ist das Ionisationsvermögen kaum merklich, das Leitungsvermögen im Aether gelöster Elektrolyte sehr klein. Die Bildungswärmen der Aether endlich sind nicht viel verschieden von denen der Alkohole, aus denen sie entstanden sind. Bei der Ausscheidung des Hydroxyls und des Wasserstoffs wird der Wärmeverbrauch annähernd aufgewogen durch die Wärmeentwickelung, die durch die Vereinigung der beiden Reste und des Hydroxyls mit dem Wasserstoff zu Wasser erfolgt.

1 c) Chemische Eigenschaften. Die Aether zeigen gegen viele Reagentien ein indifferentes Verhalten und weisen dadurch eine ziemliche Beständigkeit auf. Verdünnte Säuren, Alkalien und metallisches Natrium wirken bei gewöhnlicher Temperatur nicht ein. Mit besonderer Leichtigkeit reagiert jedoch der Jodwasserstoff mit den Aethern, weshalb er als spezifisches Reagens zur Erkennung und Spaltung von Aethern angesehen werden kann. Es entstehen bei dieser Reaktion Alkyljodide und Alkohole

$$C_2H_5.O.C_3H_7 = C_2H_5.J + C_3H_7.OH.$$

Bei gemischten Aethern verbindet sich gewöhnlich das kleinere Radikal mit dem Jod, wenn beide Kohlenwasserstoffreste primäre Radikale sind. Ist aber ein Radikal tertiär, so verbindet sich das Jod mit diesem. Bei sekundären Radikalen treten im allgemeinen Gemische auf. Die Jodwasserstoffreaktion vollzieht sich bei gewöhnlicher Temperatur und am leichtesten bei Aethern, welche Methylgruppen enthalten. In der Hitze wirken auch andere Mineralsäuren spaltend auf den Aether ein. Sehr verdünnte Schwefelsäure oder Wasser zerlegen viele Aether bei etwa 150°. Im allgemeinen sind die Aether mit sekundären und tertiären Alkylen unbeständiger als die, die primäre Kohlenwasserstoffradikale enthalten. Konzentrierte Schwefelsäure läßt in der Hitze aus den Aethern Alkylschwefelsäuren entstehen, durch Einwirkung von Phosphorpentachlorid oder Jodwasserstoffsäure bei höherer Temperatur erhält man Alkylchloride oder Jodide. Bei der Oxydation (mit Salpetersäure oder

Chromsäure) werden die Aether in dieselben Verbindungen übergeführt wie die entsprechenden Alkohole. Chlor und Brom wirken substituierend ein.

Besondere Beachtung verdienen lockere Additionsverbindungen der Aether mit Säuren und Salzen, die früher als „Molekülverbindungen" angesprochen wurden und neuerdings als „Oxoniumverbindungen" angesehen werden. Als Molekülverbindungen bezeichnet man die lose Vereinigung zweier Moleküle, in denen selbst die atomistische Valenzverteilung nicht verändert sein soll. Oxoniumverbindungen dagegen denkt man sich dadurch zustande gekommen, daß der Sauerstoff vierwertig fungiert und dadurch basische Eigenschaften erlangt. Die entstehenden Verbindungen erscheinen so als Analoga der Ammoniumverbindungen, bei denen der dreiwertige Stickstoff in den fünfwertigen übergeht

$$H_3\overset{III}{N} \longrightarrow H_3\overset{V}{N}\begin{matrix}H\\Cl\end{matrix}$$

und

$$\begin{matrix}CH_3\\CH_3\end{matrix}\!>\!\overset{II}{O} \longrightarrow \begin{matrix}CH_3\\CH_3\end{matrix}\!>\!\overset{IV}{O}\!<\!\begin{matrix}H\\Cl\end{matrix}$$

Da ja auch der dem Sauerstoff verwandte Schwefel in vierwertiger Form auftreten kann, ist eine solche Vierwertigkeit des Sauerstoffs nicht unwahrscheinlich. Oxoniumverbindungen sind von Friedel (1875) bei der Addition von Chlorwasserstoff an Dimethyläther, von Collie und Tickle (1899) bei einem cyklischen Aether, dem Dimethylpyron $CO\!<\!\begin{matrix}CH=C(CH_3)\\CH=C(CH_3)\end{matrix}\!>\!O$, von Kehrmann (1900) und von Baeyer und Villiger (1902) noch bei einer Reihe anderer sauerstoffhaltiger Substanzen beobachtet worden. Auch die Additionsverbindungen von Magnesiumalkylhaloïden mit Aethyläther, welche unter beträchtlicher Wärmeentwickelung entstehen und erst bei höherer Temperatur wieder gespalten werden, werden als Oxoniumverbindungen angesehen.

$$J.Mg.C_2H_5 + O\!<\!\begin{matrix}C_2H_5\\C_2H_5\end{matrix} = \begin{matrix}C_2H_5.Mg\\J\end{matrix}\!>\!O\!<\!\begin{matrix}C_2H_5\\C_2H_5\end{matrix}$$

2. Spezielle Aether. 2a) Aliphatische Aether. α) Aether der einwertigen Alkohole. 1. Gesättigte Aether.

Dimethyläther $(CH_3)_2O$, erhält man durch Erhitzen von Methylalkohol mit Schwefelsäure. Der Aether ist ein ätherisch riechendes Gas, Sdp. —23°, das sich in Wasser beträchtlich löst (1 Vol. Wasser löst 37 Vol. des Gases bei 18°). Mengt man den Aether mit Chlorwasserstoffgas, so beobachtet man eine Kontraktion. Es bildet sich eine bei —1° siedende Flüssigkeit, die das Additionsprodukt $\begin{matrix}CH_3\\CH_3\end{matrix}\!>\!O\!<\!\begin{matrix}H\\Cl\end{matrix}$ vorstellt (s. 1 c).

Diäthyläther (Aether schlechthin, früher Schwefeläther genannt) $(C_2H_5)_2O$ ist der wichtigste Repräsentant dieser Körperklasse und schon früh bekannt gewesen (16. Jahrhundert). Die Ermittelung seiner Konstitution bedeutete einen wichtigen Schritt in der Geschichte der Chemie. 1842 hatte Gerhardt aus theoretischen Erwägungen gefolgert, daß der Aether doppelt so viel Kohlenstoffatome im Molekül habe wie der Alkohol, während man damals diese beiden Substanzen für isomer hielt. 1850 gelang es Williamson und unabhängig davon Chancel die Gerhardtsche Ansicht durch Synthese zu beweisen und zugleich den Aetherbildungsprozeß zu erklären.

Der Aether wird technisch gewonnen durch Einwirkung von Alkohol auf konzentrierte Schwefelsäure bei 140°. Statt der Schwefelsäure läßt sich auch Benzolsulfosäure $C_6H_5.SO_3H$ verwenden. Nach dem zweiten Verfahren wird die Bildung von schwefliger Säure vermieden, die der Aether stets als Verunreinigung enthält, wenn er nach dem ersten Verfahren bereitet ist. Man hielt den Aether wegen dieser Beimengung früher für einen schwefelhaltigen Körper und nannte ihn deshalb Schwefeläther. Um den rohen Aether von der schwefligen Säure zu befreien, wäscht man ihn mit Sodalösung und entfernt dann Alkohol und Wasser durch Chlorcalcium. Völlig wasserfrei wird der Aether schließlich erhalten durch Destillation über Natriumdraht.

Einen Wassergehalt des Aethers erkennt man durch Vermischen einer Probe mit dem gleichen Volum Schwefelkohlenstoff: es tritt alsdann eine Trübung ein. Alkohol im Aether läßt sich nachweisen durch Schütteln mit etwas Anilinviolett: reiner Aether darf sich nicht färben.

Der Diäthyläther ist eine wasserhelle, sehr bewegliche Flüssigkeit von charakteristischem Geruch. Fp. —113°, Sdp. 34,6°, $d\frac{4}{4}$.0,7313. Bei 19° werden vom Wasser etwa 6,5 % Aether, bei 20° vom Aether etwa 1,2 % Wasser gelöst. Von konzentrierter Salzsäure wird Aether sehr reichlich aufgenommen; wahrscheinlich entsteht dabei eine Additionsverbindung. Auch in konzentrierter Schwefelsäure löst der Aether sich leicht. Mit Alkohol ist er in allen Verhältnissen mischbar. Ueberhaupt ist er ein ausgezeichnetes Lösungsmittel für eine sehr große Zahl organischer Stoffe, weshalb er in der präparativen Chemie sehr vielfach zum Ausschütteln (Ausäthern) benutzt wird. Auch anorganische Stoffe lösen sich in Aether, z. B. Jod, Queck-

silberchlorid, Eisenchlorid usw. Die kritische Temperatur des Aethers beträgt 194°, der kritische Druck 35,61 Atm. Der kubische Ausdehnungskoeffizient ist 0,001 656, die spezifische Wärme bei 0° 0,529. Die Verbrennungswärme eines Grammoleküls bei konstanten Druck ergibt +651,7 Kilogramm-Kalorieen, die Bildungswärme des gasförmigen Aethers + 62,8, des flüssigen +70,5. Die Verdampfungswärme bei 34,9° beträgt für 1 g-Mol. 6,7 kg-Kalorieen. Die Siedepunktserhöhung, die 1 g-Mol. einer sich normal verhaltenden Substanz in 100 g Aether verursacht, ist zu 21,1 beobachtet worden. Die Oberflächenspannung hat den Wert 16,5 dyn/cm. Der Brechungsindex n_D beträgt 1,35 424 bei 17°, die Molekularrefraktion 35,82. Die Dielektrizitätskonstante beträgt 4,68 bei 0°.

Die Dämpfe des Aethers bewirken beim Einatmen Bewußtlosigkeit; man benutzt den Aether daher in der Chirurgie zur Hervorrufung der Narkose (vor der Chloroformnarkose bietet diese Methode manche Vorteile). Für die Narkose darf nur reinster Aether genommen werden. Als Medikament wird der Aether ferner in den sogenannten Hoffmannschen Tropfen (3 Teile Alkohol, 1 Teil Aether) verwendet.

Der Aether ist sehr feuergefährlich, brennt mit leuchtender Flamme und seine Dämpfe bilden mit Luft heftig explodierende Gemenge. Deshalb ist beim Arbeiten mit Aether Vorsicht geboten. Aetherdampf kann bis 500° erhitzt werden ohne Zersetzung. Beim Stehen am Licht unter Berührung mit Luft oxydiert sich der Aether und es bilden sich Wasserstoffsuperoxyd, Acetaldehyd, Aethylalkohol, Vinylalkohol, Essigsäure und Essigsäureester. Besonders bei feuchtem Aether treten diese Verunreinigungen leicht auf. Aber auch der reinste Aether enthält nach einigen Wochen schon solche Oxydationsprodukte, eine Tatsache, die zur Beurteilung und Bewertung des „Aether pro narcosi" von großer Wichtigkeit ist. Man kann alle diese Fremdstoffe aber leicht durch Behandeln mit Kaliumhydroxyd oder metallischem Natrium wieder beseitigen. Durch katalytisch wirksame Metalle lassen sich die Oxydationswirkungen beim Aether beschleunigen: so entzündet sich Aether, wenn man ihn mit Platinschwarz in Berührung bringt. Leitet man trockenes Ozon in Aether, so entsteht das sehr explosive Aethylsuperoxyd. Diese (oder eine ähnliche) Substanz bildet sich mitunter auch unter bisher nicht genügend geklärten Bedingungen in Aether, der längere Zeit aufbewahrt war. Beim Verdampfen eines solchen Aethers treten zuweilen heftige Explosionen ein. Man erkennt die gefährliche Verunreinigung durch die lebhaften Oxydationswirkungen, welche diese Peroxyde ausüben z. B. gegen Vanadinsäure.

Der Aether bildet mit verschiedenen Substanzen eine Reihe von Additionsverbindungen. So entsteht mit Brom bei sehr tiefer Temperatur eine rotgelbe kristallisierte Verbindung $(C_2H_5)_2O.Br_2$, Fp. —40°, bei gewöhnlicher Temperatur eine rote Substanz $(C_2H_5)_2O.Br_3$, Fp. + 22°. Ebenso entsteht mit Jodwasserstoff bei tiefer Temperatur eine weiße kristallinische Additionsverbindung $(C_2H_5)_2O.HJ$ und ähnliche Produkte mit Salpetersäure, Ferrocyanwasserstoffsäure u. a. Auch einige Metallchloride vereinigen sich mit Aether zu Doppelverbindungen nach Art des Kristallwassers (Kristalläther), so Quecksilberbromid, Zinnchlorid, Zinkjodid, Magnesiumjodid u. a. Der Aether ist z. T. sehr fest gebunden, so beim $MgJ_2.2C_4H_{10}O$, welches erst bei ca. 190° zerfällt. Auch die Magnesiumhalogenalkyle geben mit Aether sehr stabile Additionsprodukte. Ueber die Bedeutung dieser Verbindungen für die „Oxoniumtheorie" s. I c.

Durch Einwirkung von Chlor entstehen eine Reihe von Substitutionsprodukten: Monochloräther $CH_3.CHCl—O—C_2H_5$ Sdp. 98°, Dichloräther $CH_2Cl.CHCl—O—C_2H_5$ Sdp. 145°, Trichloräther $CHCl_2.CHCl—O—C_2H_5$ Sdp. 170—175°, Perchloräther $C_2Cl_5—O—C_2Cl_5$ Sdp. 68° unter Zersetzung, u. a.

Die höheren Homologen der gesättigten Aether sind nach den allgemeinen Bildungsweisen zahlreich dargestellt, entbehren aber jeder Bedeutung. Es seien genannt:

Einfache Aether:

Dipropyläther $C_3H_7.O.C_3H_7$ Sdp. 90,7° d_0 0,763

Di-iso-propyläther $C_3H_7.O.C_3H_7$ Sdp. 70° d_0 0,743

Di-n-butyläther $C_4H_9.O.C_4H_9$ Sdp. 141° d_0 0,784

Di-iso-butyläther $C_4H_9.O.C_4H_9$ Sdp. 122° d_{15} 0,762

Di-iso-amyläther $C_5H_{11}.O.C_5H_{11}$ Sdp. 176° d_{15} 0,781

Di-sec-hexyläther $C_6H_{13}.O.C_3H_{13}$ Sdp. 205° bis 208°

Di-n-hepthyläther $C_7H_{15}.O.C_7H_{15}$ Sdp. 262° d_0 0,815

Di-n-ocytyläther $C_8H_{17}.O.C_5H_{17}$ Sdp. 287° d_{17} 0,805

Dicetyläther $C_{16}H_{33}.O.C_{16}H_{33}$ Fp. 57°—58°

Gemischte Aether:

Methyl-äthyläther $CH_3.O.C_2H_5$ Sdp. +11°

Methyl-propyläther CH_3 $O.C_3H_7$ Sdp. 37°

Methyl-isopropyläther $CH_3.O.C_3H_7$ Sdp. 32°

Methyl-tertiärbutyläther $CH_3.O.C_4H_9$ Sdp. 54°

Aethyl-propyläther $C_2H_5.O.C_3H_7$ Sdp. 64° d_{20} 0,739

Aethyl-isopropyläther $C_2H_5.O.C_3H_7$ Sdp. 54° d_0 0,745

Aethyl-n-butyläther $C_2H_5.O.C_4H_9$ Sdp. 92° d_0 0,769
Aethyl-isobutyläther $C_2H_5.O.C_4H_9$ Sdp. 79° d_0 0,751
Aethyl-tertiärbutyläther $C_2H_5.O.C_4H_9$ Sdp. 70° d_{20} 0,752
Aethyl-isoamyläther $C_2H_5.O.C_5H_{11}$ Sdp. 112° d_{18} 0,764
Aethyl-n-hexyläther $C_2H_5O.C_6H_{13}$ Sdp. 134° bis 137°
Aethyl-n-heptyläther $C_2H_5.O.C_7H_{15}$ Sdp. 165° d_{16} 0,790
Aethyl-octyläther $C_2H_5.O.C_8H_{17}$ Sdp. 184° d_{17} 0,794
Aethyl-cetyläther $C_2H_5.O.C_{16}H_{33}$ Fp. 20°
Isopropyl-tertiärbutyläther $C_3H_7.O.C_4H_9$ Sdp. 75°

2. Ungesättigte Aether.

Di-vinyläther
$CH_2=CH-O-CH=CH_2$, ist im Gegensatz zum Vinylalkohol eine beständige Verbindung. Er wird gewonnen aus Divinylsulfid $CH_2=CH-S-CH=CH_2$ durch Behandeln mit Silberoxyd. Der Aether ist eine dem gewöhnlichen Aethyläther sehr ähnlich riechende Flüssigkeit, Sdp. 39°.

Vinyl-äthyläther
$CH_2=CH-O-C_2H_5$ entsteht durch Einwirkung von Phosphorpentoxyd auf Acetal in Chinolinlösung, wobei Alkohol abgespalten wird

$$CH_3.CH\langle{}^{OC_2H_5}_{OC_2H_5} = CH_2=CH.O.C_2H_5 + C_2H_5.OH.$$

Auch der Jodäthyläther $CH_2J.CH_2.O.C_2H_5$ liefert beim Behandeln mit alkoholischem Kali den Vinyl-äthyläther, Sdp. 35,5°, d^{15} 0,762. Der Aether addiert leicht Chlor unter Bildung von Dichloräthyläther $CH_2Cl.CHCl-O-C_2H_5$. Durch verdünnte Schwefelsäure wird er im Acetaldehyd und Alkohol gespalten

$$CH_2:CH.O.C_2H_5 + H_2O = CH_3.CHO + C_2H_5.OH$$

Allyläther
$CH_2=CH.CH_2.O.CH_2.CH=CH_2$ Sdp. 85°.

Propenyl-äthyläther
$CH_3.CH=CH.O.C_2H_5$, Derivat des unbeständigen Propenylalkohols. Flüssigkeit von scharfem Geruch, Sdp. 69, d^{20} 0,775.

Isopropenyl-äthyläther
$CH_2=C(CH_3)-O-C_2H_5$ Sdp. 62°—63° d_0 0,790.

Propargyläthyläther
$CH\equiv C-CH_2-O-C_2H_5$, dargestellt aus Tribrompropan mit alkoholischem Kali:

$$CH_2Br-CHBr-CH_2Br+3KOC_2H_5 = CH\equiv C-CH_2-O-C_2H_5 + 2C_2H_5OH$$

Flüssigkeit von penetrantem Geruch, Sdp. 81°—85°, d^7 0,83.

β) Aether der mehrwertigen Alkohole. Acetale. Alkohole, die zwei Hydroxylgruppen an einem Kohlenstoffatom tragen, sind nicht existenzfähig; sie spalten Wasser ab und bilden Aldehyde

$$CH_3.CH\langle{}^{OH}_{OH} = CH_3.CHO + H_2O.$$

Die Aether dieser Alkohole können dagegen sehr wohl bestehen: es sind die sogenannten Acetale. Sie bilden sich hauptsächlich durch Einwirkung von Aldehyden auf Alkohole

$$CH_3.CHO + 2C_2H_5.OH = CH_3.CH\langle{}^{OC_2H_5}_{OC_2H_5} + H_2O.$$

Die Acetale verhalten sich in vieler Hinsicht abweichend von den anderen Aethern; vor allem sind sie unbeständiger wie dieselben und werden schon durch verdünnte Säuren und viele andere Reagentien leicht gespalten in Aldehyd und Alkohol. Sie erscheinen daher nicht als Alkohol- sondern als Aldehydderivate. Sie reagieren auch in mancher Beziehung wie die zugrunde liegenden Aldehyde (oder Ketone) und werden deshalb in der präparativen Chemie häufig statt der Aldehyde (oder Ketone) angewendet, zumal sie gegen Alkali beständiger sind als diese.

Methylal, Methylendimethyläther, Formal, $CH_2(OCH_3)_2$, entsteht aus Methylenjodid CH_2J_2 und Natriummethylat, Sdp. 42°, d^{20} 0,855. Findet vielfache Anwendung an Stelle des Formaldehyds.

Methylendiäthyläther
$CH_2.(OC_2H_5)_2$, Sdp. 89°, d^{20} 0,834.

Aethyliden-dimethyläther, Dimethylacetal $CH_3.CH(OCH_3)_2$, Sdp. 64°, d^{22} 0,865.

Acetal, Aethylidendiäthyläther $CH_3.CH(OC_2H_5)_2$ findet sich im Rohspiritus, Sdp. 164°, d^{20} 0,8314.

Glycoläther und Derivate. Bei mehrwertigen Alkoholen, die die Hydroxylgruppen an verschiedenen Kohlenstoffatomen tragen, können verschiedene Reihen von Aethern entstehen, je nachdem eine, mehrere oder alle Hydroxylgruppen „veräthert“ sind. Außerdem können noch durch intramolekularen Wasseraustritt zyklische Aether entstehen. Diese ringförmigen Aether (Alkylenoxyde) zeigen besonderes Verhalten und werden deshalb für sich besprochen.

Die Glycoläther und ihre Derivate lassen sich nach den allgemeinen Bildungsweisen herstellen, außerdem durch Einwirkung von Alkohol auf die Alkylenoxyde.

Glycol-dimethyläther
$CH_3.O.CH_2-CH_2.O.CH_3$ Sdp. 82°—83° d^0 0,891.

Glycolmonoäthyläther
$C_2H_5.O.CH_2-CH_2.OH$ Sdp. 127° d^{13} 0,926.

Glycoldiäthyläther
$C_2H_5.O.CH_2-CH_2.O.C_2H_5$ Sdp. 123° d^0 0,8628.

Trimethylenglycol-monoäthyläther $C_2H_5.O.CH_2-CH_2-CH_2.OH$ Sdp. 160° bis 161° d_{25}^{25} 0,915.

Glycerin-monoäthyläther, Aethylin $HO.CH_2-CH(OH)-CH_2.OC_2H_5$ Sdp. 230°, ist in Wasser löslich.

Glycerindiäthyläther, Diäthylin $HO.CH_2.CH(O.C_2H_5-CH_2.O.C_2H_5$ Sdp. 191° d^{21} 0,920, in Wasser wenig löslich.

Glycerintriäthyläther, Triäthylin $C_2H_5.O.CH_2-CH(O.C_2H_5)-CH_2.OC_2H_5$ Sdp. 185° d^{15} 0,895, in Wasser unlöslich.

Glycerinmonoallylester, Allylin, $HO.CH_2.CH(OH)-CH_2.O.C_3H_5$ Sdp. 240° d^0 1,116. Nebenprodukt bei der Darstellung des Allylalkohols.

γ) Zyklische Aether. Alkylenoxyde. Die Alkylenoxyde sind innere Aether der Glycole. Bei γ-, δ- und z. T. auch bei β-Glycolen lassen sich die Aether direkt durch Wasserabspaltung (z. B. mittels Schwefelsäure) darstellen.

Bei den α-Glycolen gelingt dies nicht. Es entstehen vielmehr statt der dreigliedrigen zyklischen Aether (α-Alkylenoxyde) die isomeren Aldehyde und Ketone

$$\begin{matrix} CH_2-OH \\ | \\ CH_2-OH \end{matrix} - H_2O \text{ nicht } = \begin{matrix} CH_2 \\ | \\ CH_2 \end{matrix}\!\!>O$$

$$\text{sondern} = \begin{matrix} CHO \\ | \\ CH_3 \end{matrix} + H_2O.$$

Allgemein bilden sich aber die α-Alkylenoxyde beim Behandeln der Glycolhalogenester (Chlor- oder Bromhydrine) mit Alkalien

$$\begin{matrix} CH_2-Cl \\ | \\ CH_2-OH \end{matrix} + KOH = \begin{matrix} CH_2 \\ | \\ CH_2 \end{matrix}\!\!>O + KOH + H_2O$$

Die fünf- und sechsgliederigen ringförmigen Aether sind beständig und ähneln in ihren Eigenschaften den gewöhnlichen Aethern. Die dreigliederigen z. T. auch die viergliedrigen Aether haben dagegen stark ungesättigten Charakter und gleichen den isomeren Aldehyden. Die Tendenz zur Addition mannigfacher Stoffe und gleichzeitiger Aufspaltung des Ringes ist sehr groß.

Aethylenoxyd $\begin{matrix} CH_2 \\ | \\ CH_2 \end{matrix}\!\!>O$ Sdp. 12,5° d^0 0,898, ist eine neutral reagierende, ätherisch riechende, bewegliche Flüssigkeit, welche mit Wasser mischbar ist. Der Aether ist isomer mit dem Acetaldehyd $CH_3.CHO$ und zeigt wie dieser große Additionsfähigkeit. Mit Wasser bildet er langsam Glycol, mit Halogenwasserstoff Halogenhydrine, mit Alkohol Glycolmonoäthyläther. Aldehyde liefern mit dem Aethylenoxyd Aethylidenalkylidenäther vom Typus $\begin{matrix} CH_2-O \\ | \\ CH_2-O \end{matrix}\!\!>CH.CH_3$. Ammoniak wird addiert zu Oxäthylamin $CH_3CH\!<\!\begin{matrix} OH \\ NH_2 \end{matrix}$, Blausäure zum Aethylidenmilchsäurenitril $CH_3CH\!<\!\begin{matrix} OH \\ CN \end{matrix}$, Natriumbisulfit zur Verbindung $CH_3.CH\!<\!\begin{matrix} OH \\ SO_3Na \end{matrix}$. Mit Phosphorpentachlorid entsteht Aethylenchlorid, mit Magnesiumalkyliden primäre Alkohole

$$\begin{matrix} CH_2 \\ | \\ CH_2 \end{matrix}\!\!>O + Mg\!<\!\begin{matrix} J \\ C_2H_5 \end{matrix} = \begin{matrix} OH_2-O-MgJ \\ | \\ OH_2-C_2H_5 \end{matrix} \longrightarrow \begin{matrix} CH_2-C_2H_5 \\ | \\ CH_2-OH \end{matrix}$$

Propylenoxyd $\begin{matrix} CH_3-CH \\ | \\ CH_2 \end{matrix}\!\!>O$ Sdp. 35° ist mit Wasser mischbar.

Dimethyläthylenoxyd $\begin{matrix} CH_3-CH \\ | \\ CH_3-CH \end{matrix}\!\!>O$ Sdp. 56°—57°.

Tetramethyläthylenoxyd $\begin{matrix} (CH_3)_2.C \\ | \\ (CH_3)_2\ C \end{matrix}\!\!>O$ Sdp. 95°—96° vereinigt sich mit Wasser unter starker Wärmeentwickelung zu Pinakon.

Trimethylenoxyd $CH_2\!<\!\begin{matrix} CH_2 \\ CH_2 \end{matrix}\!>O$, Sdp. 50°, mit Wasser mischbar.

Tetramethylenoxyd (Tetrahydrofurfuran) $\begin{matrix} CH_2-CH_2 \\ | \\ CH_2-CH_2 \end{matrix}\!\!>O$ Sdp. 57°.

Pentamethylenoxyd

$$CH_2\!<\!\begin{matrix} CH_2-CH_2 \\ CH_2-CH_2 \end{matrix}\!>O \text{ Sdp. } 82^0\ d^0\ 0{,}8800.$$

Die beiden letztgenannten Verbindungen sind gegen Wasser auch bei höherer Temperatur vollständig beständig. Sie bilden den Uebergang zu einer Klasse von heterocyklischen Verbindungen, nämlich vom Furfuran (Furan)

$$\begin{matrix} CH=CH \\ | \\ CH=CH \end{matrix}\!\!>O \text{ und Pyron } CO\!<\!\begin{matrix} CH=CH \\ CH=CH \end{matrix}\!>O,$$

indem sie gewissermaßen deren Reduktionsprodukte darstellen. Furan und Pyron kann man auch als Aether ungesättigter Glycole auffassen. Ihr besonderes chemisches Verhalten, ihre Aehnlichkeit mit Benzolderivaten und die große Zahl ihrer Derivate berechtigen jedoch die Körper als Stammsubstanzen einer besonderen Klasse von Verbindungen anzusehen und bei den hetero-

zyklischen Verbindungen gesondert zu behandeln.

Aethylenäthylidenäther

$$\begin{matrix} CH_2-O \\ | \\ CH_2-O \end{matrix} \rangle CH.CH_3$$ Sdp. 82°,5.

Diäthylenoxyd $O\langle \begin{matrix} CH_2-CH_2 \\ CH_2-CH_2 \end{matrix} \rangle O$ Fp. + 9°, Sdp. 102°, d° 1,0482.

Glycid, Epihydrinalkohol, $O\langle \begin{matrix} CH-CH_2OH \\ | \\ CH_2 \end{matrix}$, ist ein Anhydrid des Glycerins, Sdp. 162°, d_0 1,165.

Epichlorhydrin $O\langle \begin{matrix} CH-CH_2Cl \\ | \\ CH_2 \end{matrix}$ Sdp. 117°, d° 1,203, ist eine leicht bewegliche, in Wasser unlösliche Verbindung, von süßem Geschmack, die leicht aus Glycerin durch Einwirkung von Salzsäure erhältlich ist.

Epibromhydrin $CH_2-CH-CH_2Br$ (O-Brücke zwischen CH_2 und CH), Sdp. 130°—140°.

Epiäthylin $CH_2-CH-CH_2.OC_2H_5$ (O-Brücke zwischen CH_2 und CH), Sdp. 129° d^{12} 0,92.

Erythritäther $CH_2-CH-CH-CH_2$ (zwei O-Brücken), Sdp. 138°, d^{18} 1,113, stechend riechende Flüssigkeit.

Mannitan $CH_2-CH(CHOH)_3CH_2OH$ (O-Brücke zwischen CH_2 und CH) erstes Anhydrid des Mannits, bildet einen in Wasser und Alkohol leicht, in Aether schwer löslichen Gummi, der nur schwer zur Kristall sation gebracht werden kann. $[\alpha]_D = -25°$.

Mannid

$CH_2OH.CH-CH.CH-CH.CH_2OH$ (zwei O-Brücken) zweites Anhydrid des Mannits, bildet große Kristalle die sich in Wasser leicht lösen. Fp. 187°, $[\alpha]_D = +91.4°$.

2 b) Aromatische Aether. Die aromatischen Aether können nach den allgemeinen Bildungsweisen der Aether hergestellt werden. Für die große Klasse der Aether, die sich von den Phenolen herleiten, gibt es noch einige besondere Darstellungsmethoden:

1. durch Einwirkung von Diazomethan auf Phenole bei gewöhnlicher Temperatur
$C_6H_5.OH + CH_2N_2 = C_6H_5.O.CH_3 + N_2$

2. durch Einwirkung von Alkoholen auf aromatische Diazoverbindungen, eine Reaktion, bei der je nach Bedingungen auch Kohlenwasserstoffe entstehen. Meistens spielen sich beide Vorgänge gleichzeitig ab:

$$C_6H_5.N_2Cl + CH_3.OH = C_6H_5.O.CH_3 + N_2 + HCl$$
$$C_6H_5N_2Cl + C_2H_5.OH = C_6H_6 + CH_3.CHO + N_2 + HCl$$

Die aromatischen Aether, namentlich die Phenoläther sind sehr beständige Verbindungen. Alkalien wirken häufig gar nicht, verdünnte Mineralsäuren erst bei hoher Temperatur ein. Durch Jodwasserstoff, auch durch Aluminiumchlorid werden sie jedoch leicht gespalten. Phosphorpentachlorid bewirkt keine Spaltung, sondern nur eine Chlorierung im Kern. Bemerkenswert ist das häufige Vorkommen von Phenol-Methyläther-Derivaten in der Natur (Anethol, Eugenol, Vanillin usw). Zur Bestimmung der Methoxyl-Gruppen ($-O.CH_3$) in solchen Verbindungen bedient man sich der Zeiselschen Methode, die auf der Spaltung der Aether durch Jodwasserstoff beruht. Das gebildete Jodmethyl wird in Jodsilber übergeführt und so gewogen (s. Methylalkohol in dem Artikel „Alkohole").

Anisol, Methylphenyläther, $C_6H_5.O.CH_3$, angenehm ätherisch riechende Flüssigkeit: Fp. —38°, Sdp. 154,3°, d_4^{21} 0.988.

Phenetol, Aethylphenyläther, $C_6H_5.O.C_2H_5$, Sdp. 172°, d° 0,9822.

n-Propylphenyläther $C_6H_5.O.C_3H_7$, Sdp. 190°—191°, d^{20} 0,9686.

Isopropyl-phenyläther $C_6H_5.O.C_3H_7$, Sdp. 177°,2, d_4^4 0,9558.

n-Butyl-phenyläther $C_6H_5.O.C_4H_9$, Sdp. 210,3°, d° 0,9500.

Isoamyl-phenyläther $C_6H_5.O.C_5H_{11}$, Sdp. 215°, d_4^{21} 0,9198.

n-Heptyl-phenyläther $C_6H_5.O.C_7H_{15}$, Sdp. 266,8°, d_4^0 0,9319.

n-Octyl-phenyläther $C_6H_5.O.C_8H_{17}$, Fp. + 8°, Sdp. 285°, d_4^4 0,9217

Cetyl-phenyläther $C_6H_5.O.C_{16}H_{33}$, Fp. + 41,8°, $d_4^{82,4}$ 0,8434.

Allyl-phenyläther $C_6H_5.O.C_3H_5$, Sdp. 191,7°, d_{15}^{15} 0,9856.

Aethylen-diphenylenäther $C_6H_5.O.CH_2-CH_2.O.C_6H_5$ Fp. 98°.

Aethylen-äthyl-phenyläther $C_6H_5.O.CH_2-CH_2.OC_2H_5$ Sdp. 230°, d^{15} 1,018

Diphenyläther $C_6H_5.O.C_6H_5$, Fp. 28°, Sdp. 257°, riecht geraniumartig. Der Aether besitzt eine auffallend große Beständigkeit; durch Jodwasserstoff wird er auch bei 250° nicht gespalten. Starke Oxydationsmittel (Chromsäure in Eisessig) wirken nicht ein.

p-Chlorphenyl-methyläther $Cl.C_6H_4.O.CH_3$, Sdp. 197,7°.

o-Nitrophenyl-methyläther $NO_2.C_6H_4.O.CH_3$, Fp. + 9°, Sdp. 276°, d_4^{20} 0,268, farblos.

p-Nitrophenyl-methyläther $NO_2.C_6H_4.O.CH_3$, Fp. 54°, d_{20}^4 1,233, farblos.

24-Dinitrophenylmethyläther $(NO_2)_2C_6H_3.OCH_3$, Fp. 88°, gellgelbe Nadeln.

2, 4, 6-Trinitrophenylmethyläther, Pikrinsäuremethylester, $(NO_2)_3C_6H_2.OCH_3$, Fp. 64°, d^{20} 1,408.

2, 4, 6-Trinitrophenyläthyläther, $(NO)_3C_6H_2.O.C_2H_5$, Fp. 78,5°, fast farblos.

o-Amidophenyl-methyläther, o-Anisidin, $NH_2.C_6H_4.O.CH_3$, Fp. + 5°, Sdp. 225°, d_4^4 1,1062.

p-Amidophenyl-methyläther, p-Anisidin, $NH_2.C_6H_4.O.CH_3$, Fp. 57,2°, Sdp. 243, d_{55}^{55} 1,0866.

p-Amidophenyl-äthyläther, p-Phenetidin, $NH_2.C_6H_4.O.C_2H_5$, Fp. + 2,4° Sdp. 254°, d_4^{15} 1,0613.

Acetyl-p-phenetidin, Phenacetin, $CH_3CO.NH.C_6H_4.O.C_2H_5$, weiße Blättchen, Fp. 135°, wird als Antipyreticum verwendet. Ebenso die beiden folgenden Aether.

Diacetyl-p-phenetidin $(CH_3CO)_2N.C_6H_4.O.C_2H_5$, Fp. 54°.

p-Aethoxy-phenylsuccinimid Pyrantin $(CH_2CO)_2.N.C_6H_4.OC_2H_5$, Fp. 155°, soll die nachteiligen Wirkungen der Phenacetins nicht haben.

o-Kresol-Methyläther, $CH_3.C_6H_4.O.CH_3$, Sdp. 171,3°, d_{15}^{15} 0,9851.

m-Kresol-Methyläther, $CH_3.C_6H_4.O.CH_3$, Sdp. 176,6°, d_{15}^{15} 0,9766.

p-Kresol-Methyläther $CH_3.C_6H_4.O.CH_3$, Sdp. 176,5°, d_{15}^{15} 0,9757.

1-3-Xylenol-4-methyläther $(CH_3)_2.C_6H_3.OCH_3$, Sdp. 192°.

p-Isopropylphenol-methyläther $C_3H_7.C_6H_4.O.CH_3$, Sdp. 212°—213°, d_4^0 0,962.

Mesitol-methyläther $(CH_3)_3.C_6H_2.OCH_3$, Sdp. 200°—203°.

Carvacrol-methyläther

CH_3, CH_3 > C — (Benzolring mit $O.CH_3$) — CH_3, Sdp. 216,8°, d_4^0 0,9543.

Thymol-methyläther

CH_3, CH_3 > C — (Benzolring mit $CH_3.O$) — CH_3, Sdp. 216,2°, d_4^0 0,9531.

Anethol, p-Propenylanisol, $CH_3.CH{=}CH.C_6H_4.OCH_3$, findet sich im Anisöl, Sternanisöl, Fenchelöl; Fp. 22,5°, Sdp. 233°, d_{15}^{15} 0,9936, n_D 1,562, süß schmeckendes Oel.

α-Naphtol-methyläther, $C_{10}H_7.O.CH_3$ Sdp. 269°, d_4^{14} 1,096

α-Naphtol-äthyläther, $C_{10}H_7.O.C_2H_5$, Fp. + 5,5°, Sdp. 276°, d_4^4 1,0711.

α-Dinaphtyläther $C_{10}H_7.O.C_{10}H_7$, Fp. 110°, destilliert unzersetzt.

β-Naphtol-methyläther (Nerolin) $C_{10}H_7.OCH_3$ Fp. 72°, Sdp. 274°.

β-Naphtol-äthyläther $C_{10}H_7.O.C_2H_5$, Fp. 37°, Sdp. 282, d_{25}^{25} 1,0615

β-Dinaphtyläther $C_{10}H_7.O.C_{10}H_7$, Fp. 105°, Destilliert unzersetzt.

Brenzkatechin-monomethyläther, Guajacol, $C_6H_4\overset{1}{(OH)}\overset{2}{OCH_3}$, Fp. 28,3°, Sdp. 205°, d_{15}^{15} 1,1395°, entsteht bei der trockenen Destillation des Guajakharzes. In großen Mengen im Buchenholzteeröl (Kreosot) enthalten.

Brenzkatechin-dimethyläther, Veratrol, $C_6H_4(OCH_3)_2$, Fp. + 15°, Sdp. 207,1, d_{15}^{15} 1,0914.

Brenzkatechin-monoäthyläther, Guaethol, $C_6H_4(OH)OC_2H_5$ Fp. 28°—29°, Sdp. 217°.

Resorcin-monomethyläther $C_6H_4\overset{1}{(OH)}\overset{3}{OCH_3}$ Sdp. 243—244°.

Resorcin-dimethyläther $C_6H_4(OCH_3)_2$, Sdp. 217°, d_{15}^{15} 1,0617.

Hydrochinon-monomethyläther $C_6H_4\overset{1}{(OH)}\overset{4}{OCH_3}$, Fp. 53°, Sdp. 423°.

Hydrochinon-dimethyläther $C_6H_4(OCH_3)_2$, Fp. 55°—56°, Sdp. 212,6° d_{55}^{55} 1,0526.

Homobrenzkatechin-monomethyläther, Kreosol, $\overset{1}{CH_3}C_6H_3\overset{4}{(OH)}\overset{3}{OCH_3}$ findet sich im Buchenholzkreosot, Sdp. 221° bis 222°, d_{15}^{15} 1,0956.

Homobrenzkatechin-dimethyläther, Homoveratrol, $CH_3.C_6H_3(OCH_3)_2$ im Buchenholzteeröl, Sdp. 220°, d_{15}^{15} 1,0973.

Orcin-mono-methyläther $\overset{1}{CH_3}.C_6H_3\overset{5}{(OH)}\overset{3}{OCH_3}$, Sdp. 261, d_4^{21} 1,0970.

Propylbrenzkatechinmonomethyläther, Cörulignol, Blauöl, $\overset{1}{C_3H_7}.C_6H_3\overset{4}{(OH)}\overset{3}{OCH_3}$ im Buchenholzteeröl, Sdp. 240°—241°, d_4^{15} 1,0564.

Eugenol, Allylguajacol,

$CH_2{=}CH.CH_2$— (Benzolring mit $O.CH_3$) —OH Hauptbestandteil des Nelkenöls, findet sich auch im Sassafrasöl, Zimtblätteröl, Myrrhenöl, Lorbeerblätteröl, Sdp. 235°, d_{15}^{15} 1,0695. Oel von Nelkengeruch und brennendem Geschmack, gibt mit Eisenchlorid in alkoholischer Lösung Blaufärbung. Das Eugenol ist das Ausgangsprodukt bei der künstlichen Darstellung des Vanillins. Durch Erhitzen mit Kali wird es zuerst in Isoeugenol (s. u.) umgelagert. Dieses wird dann oxydiert, wodurch Vanillin

OHC—⟨ring, OCH_3⟩—OH neben Veratrumsäure

$HOOC.C_6H_3(HO)OCH_3$ entstehen.

E u g e n o l m e t h y l ä t h e r $CH_2{=}CH.CH_2{-}C_6H_3(OCH_3)_2$, Sdp. 244° bis 245°, d^{15}_4 1,055.

S a f r o l $CH_2{=}CH.CH_2$—⟨ring⟩$\langle{}^{O}_{O}\rangle CH_2$ ist ein zyklischer Aether (Methylenäther), welcher im Sassafrasöl vorkommt, Fp. +8°, Sdp. 232°, d^{18} 1,0956 gibt bei der Oxydation Piperonal OHC—⟨ring⟩$\langle{}^{O}_{O}\rangle CH_2$ und Piperonylsäure.

B e t e l p h e n o l , Chavibetol, $CH_2{=}CH.CH_2$—⟨ring, OH⟩—OCH_3, findet sich im Betelblätteröl. Sdp. 254°—225°, d^{15} 1,067.

I s o e u g e n o l $CH_3.CH{=}CH$—⟨ring, OCH_3⟩—OH Sdp. 267°, d^{15}_{15} 1,0907.

I s o e u g e n o l m e t h y l ä t h e r $CH_3.CH{=}CH.C_6H_3(OCH_3)_2$, Sdp. 263°.

I s o s a f r o l $CH_3.CH{=}CH$—⟨ring⟩$\langle{}^{O}_{O}\rangle CH_2$, Sdp. 246°—248°.

P y r o g a l l o l t r i m e t h y l ä t h e r $C_6H_3(OCH_3)_3$ Fp. 47°, Sdp. 241°, d^{15}_{15} 1,1118.

P h l o r o g l u c i n t r i m e t h y l ä t h e r $C_6H_3(OCH_3)_3$, Fp. 52°.

M y r i s t i c i n $CH_2{=}CH.CH_2$—⟨ring, $O.CH_3$⟩$\langle{}^{O}_{O}\rangle CH_2$ Sdp.$_{10}$ 142°, d_{15} 1,141 findet sich im Muskatblüten- und Petersilienöl.

A p i o l $CH_2{=}CH.CH_2$—⟨ring, OCH_3, OCH_3⟩$\langle{}^{O}_{O}\rangle CH_2$ findet sich im Petersiliensamöl, Fp. 30°, Sdp. 294°.

B e n z y l m e t h y l ä t h e r $C_6H_5CH_2.O.CH_3$ Sdp. 170,5° d^{15} 0,9711.

B e n z y l - ä t h y l ä t h e r , $C_6H_5CH_2.O.C_2H_5$ Sdp. 185°.

B e n z y l - n - p r o p y l ä t h e r $C_6H_5CH_2.O.C_3H_7$ Sdp. 196°.

B e n z y l a m y l ä t h e r $C_6H_5CH_2.O.C_5H_{11}$ Sdp. 231°—232°, d^{22} 0,911.

B e n z y l p h e n y l ä t h e r $C_6H_5CH_2.O.C_6H_5$, Fp. 38°—39°, Sdp. 286° bis 287°.

D i b e n z y l ä t h e r $C_6H_5CH_2.O.CH_2C_6H_5$, Sdp. 295°—298° d^{16} 1,0359.

B e n z h y d r o l - ä t h y l ä t h e r $(C_6H_5)_2\,CH.O.C_2H_5$, Sdp. 288° d^{20} 1,029.

B e n z h y d r o l ä t h e r $(C_6H_5)_2CH.O.CH.(C_6H_5)_2$ Sdp. 267°.

T r i p h e n y l c a r b i n o l m e t h y l ä t h e r $(C_6H_5)_3C.O.CH_3$ Fp. 82°.

T r i p h e n y l c a r b i n o l - ä t h y l ä t h e r $(C_6H_5)_3C.O.C_2H_5$, Fp. 83°.

T r i p h e n y l c a r b i n o l - p r o p y l ä t h e r $(C_6H_5)_3C.O.C_3H_7$ Fp. 56°.

Literatur. ***F. Beilstein,*** *Handbuch der organischen Chemie, Hamburg 1893 bis 1906.*

G. Reddelien.

Aetzfiguren.

1. Die Aetzfiguren als Resultat der von der Richtung abhängigen Auflösungsgeschwindigkeit eines Kristalls. 2. Die Gestalt der Aetzfiguren ist abhängig von ihrer Bildungsgeschwindigkeit. 3. Mit Hilfe der Lichtfiguren kann nachgewiesen werden, daß die Aetzflächen dem Gesetz von der Rationalität der Indices gehorchen. 4. Die Aetzflächen besitzen einen maximalen Lösungswiderstand. 5. Die Aetzfiguren wechseln mit dem Lösungsmittel. 6. Die Aeztfiguren als wichtiges Hilfsmittel zur Erkennung der Symmetrieeigenschaften eines Kristalls. 7. Anomale Aetzfiguren.

1. Die Aetzfiguren als Resultat der von der Richtung abhängigen Auflösungsgeschwindigkeit eines Kristalls. Wie alle Eigenschaften, so hängen auch W a c h s t u m und A u f l ö s u n g s g e s c h w i n d i g k e i t bei einem Kristall von der Richtung ab, d. h. sie sind in verschiedenen Richtungen im allgemeinen verschieden groß. Für die Auflösung hat das L a v i z a r i dadurch nachgewiesen, daß er Kugeln von Aragonit, Kalzit und Dolomit der Einwirkung von Salpetersäure aussetzte. Hierbei ging die Kugelform regelmäßig sehr bald verloren und es entstand aus ihr beispielsweise beim Kalkspat eine hexagonale Pyramide — ein Resultat, das nur durch eine von der Richtung abhängige Auflösungsgeschwindigkeit erklärt werden konnte. Schon lange

vor Lavizzari haben Daniel und F. Leydolt auf ganz ähnliche Erscheinungen aufmerksam gemacht, wenn sie sie auch noch nicht in der angedeuteten Weise erklärt haben. Speziell Leydolt hat sich viel mit der Zersetzung relativ leicht löslicher Kristalle, wie Steinsalz, Alaun, Salpeter usw in einer feuchten Atmosphäre beschäftigt. Eine solche Zersetzung setzt im allgemeinen nicht etwa an allen Stellen gleichmäßig ein, sondern sie beginnt infolge von Inhomogenitäten an der Kristalloberfläche, oder ähnlichen Ursachen von einzelnen Punkten aus. Sie schreitet auch nicht nach allen Richtungen gleichmäßig fort. Es entstehen infolgedessen keine kugelförmigen, sondern gesetzmäßig von ebenen Flächen begrenzte Vertiefungen. Für sie hat man allgemein den Namen Aetzfiguren eingeführt.

2. Die Gestalt der Aetzfiguren ist abhängig von ihrer Bildungsgeschwindigkeit. Beide, Daniel und Leydolt, haben darauf aufmerksam gemacht, daß diese Aetzfiguren einen merkwürdigen Parallelismus mit den Symmetrieeigenschaften der betreffenden Mineralien aufweisen. Denn Leydolt fand, daß auf den Würfelflächen des Steinsalzes regelmäßig vierseitig, auf den Oktaederflächen des Alaun dreiseitig begrenzte Vertiefungen entstehen, also allgemein Vertiefungen, die in enger Beziehung zur äußeren Gestalt des Kristalls stehen. Ferner liegen, wenn wir als Beispiel das Steinsalz herausgreifen, die vierseitigen Aetzfiguren nicht wirr durcheinander, sondern ihre Kanten gehen einander und ebenso denen des ganzen Kristalls parallel, wie das auf Figur 1 zu sehen ist. Also auch hier herrscht eine Gesetzmäßigkeit. Weiterhin zeigt die gleiche Kristallfläche, wenigstens wenn man dieselbe Methode der Aetzung beibehält, immer wieder die gleiche Aetzfigur. Das trifft allerdings dann meistens nicht mehr zu, wenn wir das Lösungsmittel, mit dem wir ätzen, ändern. Hierüber hat besonders V. v. Ebner eingehende Untersuchungen angestellt. Er hat einmal den Kalkspat mit konzentrierter Salz- und Salpetersäure geätzt und ferner auch mit konzentrierter Ameisensäure. Im ersteren Falle bildeten sich die Aetzfiguren sofort und Ebner nennt sie daher instantane. Im zweiten Fall entstanden sie nur langsam; daher werden sie retardierte genannt, und wiesen auch andere Formen auf. Beide Arten bezeichnet man auch allgemein als Lösungsgestalten. Ebner konnte nun wenigstens für den Kalkspat nachweisen, daß die voneinander abweichenden Ausbildungsformen der Aetzfiguren bedingt sind durch die verschiedenen Geschwindigkeiten, unter denen sie sich bilden. Das ist auch durchaus verständlich. Wenn wir nämlich, wie wir das auf Grund zahlreicher anderer Untersuchungen tun müssen, die Auflösung als den dem Wachstum in jeder Beziehung reziproken Vorgang auffassen, so haben wir bei dem Kristallwachstum ein vollkommenes Analogon zu den eben besprochenen Erscheinungen am Kalkspat, denn es ist ja allgemein bekannt, daß die Gestalt eines Kristalles sehr stark beeinflußt wird durch seine Wachstumsgeschwindigkeit, daß er andere Formen dann ausbildet, wenn er schnell, statt langsam wächst. Im ersten Fall treten Vizinalflächen besonders gern auf. Wenn eine Fläche so stark geätzt wird, daß die einzelnen Aetzgrübchen dicht aneinander grenzen und infolgedessen die Reste der ursprünglichen Kristalloberflächen als Erhebungen emporragen, so bezeichnet man sie nach dem Vorgange von Becke als Aetzhügel. Für sie gelten natürlich auch die gleichen Gesetze wie für die Aetzgrübchen.

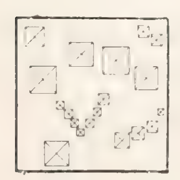


Fig. 1.

3. Mit Hilfe der Lichtfiguren kann nachgewiesen werden, daß die Aetzflächen dem Gesetz von der Rationalität der Indices gehorchen. Durch die Aetzung wird nun auch noch eine andere, oft sehr schöne Erscheinung hervorgerufen, auf die schon D. Brewster aufmerksam gemacht hat, nämlich die Lichtfiguren. Bringt man eine angeätzte Kristallfläche dicht vor das Auge und zwar so, daß die von einer etwa 1 bis 2 m entfernten Lichtquelle ausgehenden Strahlen auf ihr reflektiert in das Auge dringen, so erscheint das Gesichtsfeld nicht gleichmäßig hell, sondern man beobachtet mehrere gerade oder gebogen verlaufende und sich durchkreuzende Lichtstrahlen. Nach Brewster haben sich vor allen Dingen Leydolt, v. Kobell, K. Haushofer, L. Wulff und F. Becke damit beschäftigt, wie diese Lichtfiguren zustande kommen. Durch ihre Untersuchungen wissen wir, daß sie auf der Beugung des Lichtes an den kleinen, durch die Aetzung gebildeten Flächen beruhen. Daß übrigens ein solch enger Zusammenhang zwischen Aetz- und Lichtfiguren bestehen muß, ersieht man schon aus den nachstehenden Abbildungen, wo in Figur 2 die Aetzfiguren auf der Rhomboederfläche des Kalk-



Fig. 2.

spates und in Figur 3 die dadurch verursachten Lichtfiguren dargestellt sind. Ebenso gibt Figur 4 eine stark geätzte Würfelfläche am Sylvin wieder. Auf ihr sieht man sowohl ein-

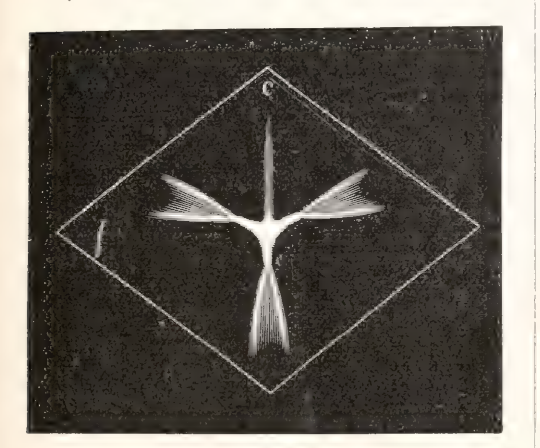


Fig. 3.

zelne, wohl ausgebildete Aetzgrübchen als auch Aetzhügel, „die sich in diesem Falle darstellen als eine, nach zwei Richtungen diagonal zur äußeren Umrandung des Grübchens verlaufender Streifung“. Diese Fläche liefert die in Figur 5 abgebildete Lichtfigur, „welche

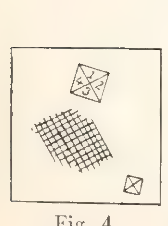


Fig. 4.

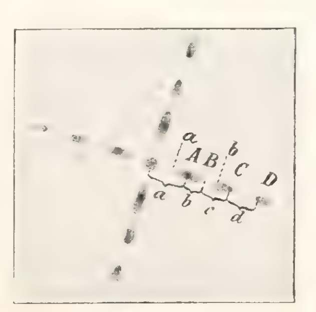


Fig. 5.

diagonal zur Streifung orientiert, einem rechtwinkligen Kreuze gleicht mit mehreren ausgezeichneten Kulminationspunkten“. Da wir nun, wie ich schon angedeutet habe, die Aetzgrübchen sozusagen als negative Kristalle aufzufassen haben, so müssen wir auch annehmen, daß die sie begrenzenden Flächen dem Gesetze von der Rationalität der Indices gehorchen. Tatsächlich ist diese Vermutung experimentell bestätigt worden von G. L i n c k am Sylvin. Indem er an der oben abgebildeten Lichtfigur (Fig. 5) auf dem Goniometer die Abstände der einzelnen Kulminationspunkte voneinander maß, konnte er nachweisen, daß die diese Lichtpunkte hervorrufenden Flächen auf der a-Achse Abschnitte liefern, die in dem rationalen Verhältnis 2: 5: 6 stehen. In der gleichen Weise hat sich F. B e c k e eingehend mit diesem Gegenstand beschäftigt. Er hat ebenfalls am Goniometer Lichtfiguren ausgemessen und damit die kristallographische Lage der Aetzfläche bestimmt. Insbesondere hat er dabei seine Aufmerksamkeit den sogenannten P r ä r o s i o n s f l ä c h e n zugewandt, unter denen man die Aetzflächen versteht, die sich an Kanten und Ecken eines Kristalls ausbilden und diese letzteren abstumpfen, so, wie man das in der Figur 6 am Kalkspat sieht. In neuester Zeit hat H. T h i e n e sehr

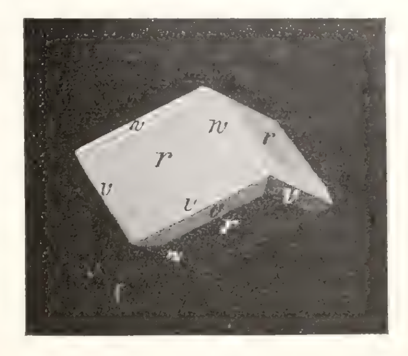


Fig. 6.

schöne Lichtfiguren am Beryll von Tonker hoek in Südwestafrika beobachtet und daran wiederum das Gesetz von der Rationalität der Indices nachgewiesen.

4. **Die Aetzflächen besitzen einen maximalen Lösungswiderstand.** Nachdem durch diese Arbeiten der Beweis erbracht war, daß die Aetzflächen ihrer Lage nach scharf definiert sind, kam es B e c k e darauf an, zu erforschen, welche von den kristallographisch möglichen Flächen sich nun letzten Endes bei der Aetzung ausbilden. Zu seinen Versuchen verwandte er Zinkblende, Bleiglanz, Magnetit und Flußspat, alles Mineralien, die sehr scharf ausgeprägte Aetzfiguren liefern. An ihnen hat B e c k e einwandfrei nachweisen können, daß die die Aetzfigur begrenzenden Flächen regelmäßig eine minimale Lösungsgeschwindigkeit besitzen, oder was dasselbe heißt, einen maximalen Lösungswiderstand. B e c k e kam zu diesem Resultat durch die Messung von A u f l ö s u n g s - g e s c h w i n d i g k e i t e n und zwar verfuhr er dabei in folgender einfacher Weise. Mehrere ihrer Lage nach verschiedene, angeschliffene Kristallflächen setzte er für gleich lange Zeiten der ätzenden Wirkung des gleichen Lösungsmittels aus und maß dann vermittels einer Mikrometerschraube, wie tief die Aetzung gedrungen war, d. h. wie viele Substanz sich von der ursprünglichen Fläche abgelöst hatte. Das lieferte ihm dann sofort

ein relatives Maß für die Auflösungsgeschwindigkeit der einzelnen Kristallflächen, die, wie sich hierbei ebenfalls herausstellte, im allgemeinen von Fläche zu Fläche außerordentlich verschieden ist. Z. B. verhält sich die Lösungsgeschwindigkeit von Würfel: Oktaeder: Rhombendodekaeder am Fluorit in Sodalösung wie 2,75:1,00:1,17, dagegen in Salzsäure wie 1,00:1,48:1,62.

5. Die Aetzfiguren wechseln mit dem Lösungsmittel. Aus den angeführten Zahlen geht außerdem hervor, daß die Lösungsgeschwindigkeit auch in hohem Maße abhängt von dem Lösungsmittel. Denn während in Sodalösung sich die Würfelfläche des Fluorits bei weitem am schnellsten löst, wird in Salzsäure von den drei Flächen das Rhombendodekaeder am stärksten angegriffen. Andererseits gibt es aber auch hier wieder gewisse Regelmäßigkeiten, denn sowohl in Salzsäure wie in Sodalösung lösen sich Würfel, Oktaeder, Dodekaeder verhältnismäßig viel langsamer auf als Ikositetraeder, Triakisoktaeder und Tetrakishexaeder. Die Flächen nun mit minimaler Lösungsgeschwindigkeit, d. h. nach dem vorigen die, welche vor allen Dingen als Begrenzung der Aetzhügel und Aetzgrübchen auftreten, bezeichnet B e c k e als H a u p t ä t z f l ä c h e n und die Zone, der die Hauptätzflächen angehören, als H a u p t ä t z z o n e. Beispielweise bilden bei Zinkblende Salzsäure gegenüber die Flächen (111) (001) die Hauptätzzone. Aber nicht nur bei Salzsäure ist das der Fall, sondern allgemein bei allen Säuren, die B e c k e angewandt hat. Dagegen wird die Zinkblende durch Alkalien in ganz anderer Weise geätzt. Hieraus hat B e c k e folgenden wichtigen Schluß gezogen: „Der Erfolg der Aetzung wird bei einer Aenderung des Lösungsmittels dann ein anderer, wenn durch das neue Aetzmittel ein ganz anderer chemischer Prozeß hervorgerufen wird.“ Freilich vollkommen identische Aetzfiguren liefern verschiedene Säuren meistens auch nicht, ja, es treten sogar oft schon merkliche Unterschiede auf, wenn man die gleiche Säure in verschiedener Konzentration anwendet. Ein besonders lehrreiches Beispiel hierfür bieten die Versuche B a u m h a u e r s am Apatit. Wenn man diesen mit Salzsäure auf der Basis ätzt, dann entstehen Aetzfiguren, die ihrer Lage nach Pyramiden dritter Art entsprechen, deren Drehung aber mit der Konzentration der Säure variiert. Bei jeder Konzentration gibt es solche mit positivem (ε) und negativem (ε_1) Drehungswinkel (Fig. 7). Wie nun die folgende Tabelle zeigt, hängen ε und ε_1 sehr stark ab von der Konzentration der Säure.

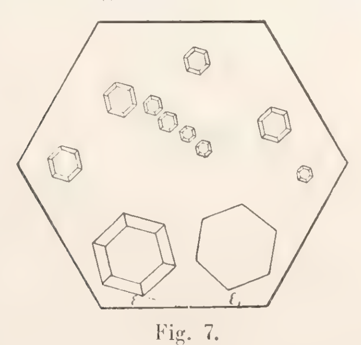


Fig. 7.

Drehung der Aetzfiguren am Apatit bei Verwendung einer mit Wasser zu verdünnenden Salzsäure vom spez. Gew. 1,130. Nach B a u m h a u e r.

Gehalt an HCl	Drehungswinkel E	E¹	
100 %	27°20′	27°10′	
80 %	24°30′	28°57′	
60 %	22°57′	28°43′	(negativ)
40 %	19°33′	22°10′	
20 %	18°40′	28°′	
10 %	18°21′	28°31′	
5 %	18°5′	—	
1 %	17°4′	—	

6. Die Aetzfiguren als wichtiges Hilfsmittel zur Erkennung der Symmetrieeigenschaften eines Kristalls. Besondere Aufmerksamkeit und Bedeutung haben aber die Aetzfiguren deswegen gewonnen, weil sie, wie schon in der Einleitung angedeutet wurde, ein ausgezeichnetes Mittel zur Bestimmung der Symmetrieeigenschaft eines Kristalls darstellen. Sie sind in dieser Beziehung tatsächlich das beste Erkennungsmerkmal, das wir besitzen und sind insbesondere den optischen Methoden weit überlegen. Aus dem Fundamentalgesetz der Kristallographie, daß jeder geometrischen Symmetrie auch eine Symmetrie in den physikalischen Eigenschaften entsprechen muß, folgt ja ohne weiteres der übrigens von B e c k e auch experimentell festgestellte Satz, daß geometrisch gleiche Flächen auch gleiche Auflösungsgeschwindigkeiten besitzen müssen. Hieraus wiederum ergibt sich als nötige Konsequenz, daß die Aetzfiguren alle Symmetrieeigenschaften des Kristalls selbst besitzen müssen und daß umgekehrt Symmetrieeigenschaften, die die Aetzfiguren nicht besitzen, auch dem Kristall nicht zukommen. Von diesem Gesichtspunkt aus hat zuerst B r a u n s nachgewiesen, daß NaCl und KCl nicht zur gleichen Klasse des regulären Systems gehören, sie also auch nicht, wie man früher meinte, isomorph sind, denn die Aetzfiguren am Steinsalz entsprechen Pyramidenwürfeln (Fig. 1), die am Sylvin (Fig. 4) rechten Gyroedern. Daraus folgt, daß das Chlornatrium regulär holoedrisch kristallisiert, das Chlorkalium höchstens zur gyroedrisch-hemiedrischen

Klasse gehört. Ebenso hat man nachgewiesen, daß auch Kalkspat und Dolomit nicht in die gleiche Symmetrieklasse gehören, denn Kalkspat zeigt auf der Rhomboederfläche monosymmetrische Aetzfiguren (Fig. 2), der Dolomit dagegen asymmetrische (Fig. 8). Infolgedessen ist der Kalkspat hemiedrisch, der Dolomit rhomboedrisch-tetartoedrisch. So könnte man noch eine große Reihe von Mineralien aufzählen, wo die Aetzfiguren das Mittel zur Erkennung ihrer Symmetrieeigenschaften waren und damit auch zur Entscheidung der Frage, welche Kristalle isomorph miteinander sind und welche nicht. Denn nach der Definition des Isomorphismus müssen wir ja erwarten, daß zwei wirklich isomorphe Körper auch gleiche, d. h. gleich symmetrische Aetzfiguren zeigen, wie das ja auch tatsächlich beispielsweise für die Reihe der Phosphate Apatit, Mimetesit, Pyromorphit und Vanadinit zutrifft.

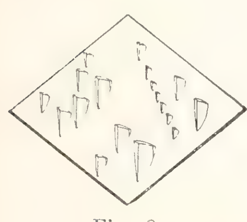


Fig. 8.

7. Anomale Aetzfiguren. Aber ebenso, wie es optisch anomale Kristalle gibt, gibt es auch solche, die sich in bezug auf die Aetzfiguren anomal verhalten, d. h. danach eine geringere Symmetrie aufweisen, als ihnen tatsächlich geometrisch zukommt. Solche abnorm unsymmetrischen Aetzfiguren hat z. B. Beckenkamp in neuerer Zeit am Baryt und Aragonit ausführlich beschrieben und E. Sommerfeldt hat auch dafür auf struktur-theoretischer Grundlage die Erklärung zu geben versucht. Vor Beckenkamp hat schon Becke an gewissen Flußspatkristallen ähnlich anomale Aetzfiguren beobachtet; dabei ist ihm außerdem aufgefallen, daß mit der Aetzanomalie immer eine optische Anomalie Hand in Hand geht. Das erscheint besonders wichtig zur Erklärung dieser ganzen Erscheinung, denn jedenfalls werden, wie auch Becke hervorhebt, die beiden Anomalien die gleichen Ursachen haben.

Literatur. ***H. Baumhauer,*** *Die Resultate der Aetzversuche, Leipzig 1894.* — ***Lavizzari,*** *Nouveaux phénomenes des corps crystalisés Lugano 1865.* — ***V. v. Ebner,*** *Sitzungsberichte der Wiener Akademie 1854. Ueber eine neue Methode, die Struktur und Zusammensetzung der Kristalle zu untersuchen mit besonderer Berücksichtigung der Varietäten des rhomboedrischen Quarzes.* — ***Derselbe,*** *Die Lösungsflächen des Kalkspates und des Aragonites I, Lösungsflächen und Lösungsgestalten des Kalkspates, Sitzungsberichte der K. K. Akad. d. Wissensch., Wien 1884, 89, II, S. 369.* — ***Derselbe,*** *Die Lösungsflächen des Kalkspates und Aragonits II. Die Aetzfiguren des Kalkspates III. Die Lösungsflächen des Aragonits.* — ***F. Becke,*** *Aetzversuche an Mineralien der Magnetitgruppe, Tschermaks min. petr. Mitteilungen, Bd. VII, 1885, S. 200.* — ***Derselbe,*** *Aetzversuche am Fluorit, Tschermaks min. min. petr. Mitteil., Bd. XI, 1889, S. 349.* — ***Derselbe,*** *Aetzversuche am Pyrit, Tschermaks min. petr. Mitteilungen, Bd. VIII, 1886, S. 239.* — ***G. Linck,*** *Aetzfiguren am Sylvin, Tschermaks min. petr. Mitteilungen XII, 1891, S. 82.* — ***H. Thiene,*** *Ueber Apatit und Beryll von Tonkerhoek, Neues Jahrbuch für Mineralogie 1909. S. 97.* — ***R. Brauns,*** *Ein Beitrag zur Kenntnis der Strukturflächen des Sylvin. Neues Jahrbuch für Mineralogia 1886, S. 224.* — ***E. Sommerfeldt,*** *Anormale Aetzfiguren und ihre Erklärung durch die Strukturtheorie, Zentralblatt für Mineralogie 1907, S. 111.*

A. Ritzel.

Afterkristalle.

Pseudomorphosen.

1. Wesen und Bedeutung der Afterkristalle. 2. Ursachen ihrer Entstehung. 3. Nomenklatur. 4. Paramorphosen. 5. Umwandlungspseudomorphosen. 6. Verdrängungspseudomorphosen. 7. Umhüllungspseudomorphosen. 8. Künstliche Nachbildung von Afterkristallen.

1. Wesen und Bedeutung der Afterkristalle. Die Mineralien sind nach ihrem Entstehungsakt durch physikalische und chemische Einflüsse fortwährenden Wandlungen unterworfen. Meist wirken diese Faktoren indessen so langsam, daß sich die Veränderungen, die sie hervorrufen, nicht direkt beobachten lassen; oder die Vorgänge haben sich schon vor langen Zeiträumen abgespielt, so daß nunmehr allein die entstandenen Umwandlungsprodukte vorliegen. Erfolgen die Alterationsvorgänge an mehr oder weniger gut ausgebildeten Kristallen derart, daß sie sich ohne wesentliche Aenderungen der ursprünglichen Kristallbegrenzung vollziehen, so entstehen Gebilde, die als Afterkristalle (Pseudomorphosen) bezeichnet werden. Aeußerlich stellen sie sich dar als polyedrische Körper, die bisweilen noch ebene Flächen und scharfe Kanten besitzen. Innerlich bestehen sie indessen nicht immer aus einem einheitlichen Individuum, sondern sind bisweilen aus Aggregaten von körniger, blättriger oder dichter Struktur gebildet. Die Substanz, die nach der Umwandlung das Kristallgebäude erfüllt, zeigt bei Untersuchung ihrer physikalischen Eigenschaften, daß die aufgeprägte Kristallform keineswegs die ihr eigentümliche ist. Sie erweist sich bisweilen als amorph, trotz polyedrischer Begrenzung, oder die optischen Eigenschaften sind die eines doppeltbrechen-

den Körpers, während jene reguläre Symmetrie besitzt.

Diese Inkongruenz zwischen der äußeren kristallographischen Begrenzung und den physikalischen Eigenschaften der Substanz liefert ein Unterscheidungsmerkmal der Afterkristalle von echten Kristallen. Denn es kann noch die Substanz jener der des ursprünglichen Kristalls chemisch gleich sein. Indessen sind diese Pseudomorphosen verhältnismäßig selten. Weit mehr verbreitet sind die Arten von Pseudomorphosen, die ihre Entstehung einfachen oder komplizierteren physikalisch-chemischen Prozessen verdanken. Hierbei verändern sich die Kristalle in der Weise, daß ihre Bestandteile vollständig oder nur teilweise fortgeführt, ersetzt oder umgewandelt werden.

Die Bedeutung der Afterkristalle liegt nun darin, daß ihre rückständige Kristallform den Ausgangspunkt einer Reihe von Umwandlungsvorgängen festlegt, indem sie eine Bestimmung des Ursprungsmaterials ermöglicht, selbst wenn dieses in der Pseudomorphose völlig verschwunden ist. Diese dagegen markiert in ihren geänderten physikalischen und chemischen Eigenschaften einen zweiten Punkt der Umwandlungserscheinung. Durch das Studium der Pseudomorphosen kann man daher häufig Vorgänge, die z. B. auf Erzlagerstätten umbildend tätig gewesen waren, kennzeichnen, die dann wiederum zu wichtigen Schlüssen in genetischer Hinsicht führen.

2. Die Ursachen ihrer Entstehung. Treten chemische Aenderungen bei der Pseudomorphosierung nicht auf, so können nur Einwirkungen physikalischer Natur, also Druck-, Temperaturänderungen tätig gewesen sein. Derartig gebildete Afterkristalle hat man mit dem Namen Paramorphosen belegt.

Die chemische Beeinflussung erfolgt durch die Atmosphärilien Sauerstoff, Kohlensäure und Wasser oder durch wässerige Lösungen, die überall auf der Erdoberfläche zirkulieren und mit Salzen aller Art beladen sind. Wenn auch diese Lösungen z. T. sehr verdünnt sind, so widersteht ihnen doch infolge der langandauernden Einwirkung kein Mineral. Es entstehen auf solche Weise, indem sich Bestandteile des Minerals mit denen der Lösung verbinden, Oxyde, Hydroxyde, wasserhaltige Silikate, Karbonate u. a.; durch reduzierend wirkende Stoffe können aus Metallverbindungen kristallisierte Metalle abgeschieden werden.

Die Entstehung der Pseudomorphosen ist durch gleiche Ursachen bedingt, wie die Verwitterung der Minerale an sich. J. Roth unterschied, allerdings willkürlich, einfache und komplizierte Verwitterung. Einfache Verwitterung bedingt, durch die Atmosphärilien, sollte zu Karbonaten, Oxyden, wasserhaltigen Produkten führen, etwa wie bei der Pseudomorphosierung von Eisenspat. Aus $FeCO_3$ bildet sich durch kohlensäurereiches, sauerstoffhaltiges Wasser Brauneisenerz $2\,Fe_2O_3.3\,H_2O$. Komplizierte Verwitterung, durch Hinzutreten von Salzlösungen, sollte die übrigen Umwandlungserscheinungen hervorrufen. Insbesondere sind hier zu nennen die durch doppelte Umsetzung eines reziproken Salzpaars entstehenden Produkte. Wenn z. B. Gips $CaSO_4.2\,H_2O$ mit Lösungen von Natriumkarbonat in Berührung gelangt, so tritt ein wechselseitiger Umsatz ein. Es bildet sich lösliches Natriumsulfat, während die Kohlensäure im neugebildeten Kalkspat oder Aragonit zurückbehalten wird.

So entstehen die Umwandlungspseudomorphosen, indem neue Gebilde hervorgehen, die durch Verlust oder Aufnahme von Stoffen oder durch beide Wirkungen zugleich aus dem Ursprungsmaterial abzuleiten sind. Der Umwandlungsvorgang selbst wird, wenn die Kristallform erhalten blieb, langsam fortgeschritten sein. Er beginnt meist in der äußeren Rinde und dringt auf Spaltrissen weiter ins Innere, wodurch z. B. beim Olivin ein Netz von Serpentinmaterial entsteht, das noch unveränderte Olivinkörner enthält. Das Mikroskop hat zahlreiche derartige Umwandlungserscheinungen an den gesteinsbildenden Mineralien kennen gelehrt. Fast stets ist bei diesen Silikaten die Umwandlung mit einer Wasseraufnahme verbunden. Manchmal beginnt auch die Umwandlung im Innern eines sonst scheinbar vollkommenen Kristalls: Plagioklase zeigen bisweilen äußerlich keine Veränderung. Zerschlägt man aber einen solchen Kristall, so erscheint im Innern ein in Kaolin umgewandelter Kern. Die Lösung ist auf feinen, kapillaren Sprüngen ins Innere eingedrungen. Da nun der Kristall hier aus basischen, leichter angreifbaren Stoffen bestand, so hat an dieser Stelle die Umwandlung begonnen. Die Hülle ist, weil aus widerstandsfähigerem Material aufgebaut, fast nicht alteriert worden.

Nicht nur die Form, sondern auch die Spaltbarkeit des ursprünglichen Minerals kann dem Afterkristall erhalten bleiben, oder es können sich gar „Pseudomorphosen nach der Spaltbarkeit“ bilden (J. Samojloff, Zentralbl. f. Min. usw. 1908 6). Auf Erzgängen des Nagolnygebirges tritt Cerussit in dünnen Tafeln auf, die, sich regelmäßig schneidend, eine Reihe von Kammern bilden. Die Richtungen dieser Tafeln entsprechen den Richtungen der Spaltbarkeit von Zinkblende. In deren Spaltrissen haben zirkulierende bleihaltige Gewässer Bleikarbonat abgesetzt. Dann wurde die Zinkblende aufgelöst, so daß als „Rest“ nur die Spaltenausfüllungen zurückblieben.

In manchen Fällen ist der Afterkristall

kristallographisch zum primären Kristall orientiert; man bezeichnet solche, wenn z. B. die Richtung der kristallographischen Hauptachse dieselbe blieb, als homoachse Pseudomorphosen.

Von den Umwandlungspseudomorphosen hat man die Gruppe der Verdrängungspseudomorphosen abgetrennt. Hier tritt ein schwerer lösliches Mineral (Gips) an die Stelle eines leichter löslichen (Steinsalz). Es ist bei völligem Verschwinden des primären Minerals schwierig zu entscheiden, ob nicht etwa eine Umhüllungspseudomorphose (7) vorliegt. Wird nämlich auf mechanischem Wege oder durch chemischen Niederschlag ein Kristall durch eine schwerlösliche Substanz umhüllt, und wird er nun durch irgendeinen Vorgang aufgelöst, so entsteht ein Hohlraum, der eine Form für die ihn füllende Substanz abgibt. Auch kann ein Kristall aus einem Gestein herauswittern, und der freie Raum Gelegenheit zur Bildung einer Pseudomorphose geben. Die so entstehenden Ausfüllungspseudomorphosen zeigen häufig innerlich unvollständige Ausfüllung durch Kristalle, die eine nach dem Innern zu gerichtete Stellung einnehmen.

3. Nomenklatur. Die Bezeichnung Afterkristalle führte A. Werner ein; der Ausdruck Pseudomorphose stammt von R. J. Hauy. Die Einteilung der Pseudomorphosen nach den eben geschilderten Entstehungsursachen rühren von R. Blum her, der zuerst eine systematische Bearbeitung ausführte. Ihm verdankt man auch die Ausdrucksweise „Pseudomorphose von A nach B“, worin B die primäre Substanz bezeichnet. Andere Einteilungen schlugen noch vor C. F. Naumann, A. Kenngott und E. Geinitz (vgl. die Literaturangaben). Die chemische Umbildung großer Massen dichter Mineralien wird im allgemeinen nicht als Pseudomorphose betrachtet; wie ja auch durch den Namen Afterkristall ausgedrückt werden soll, ist hierzu die Erhaltung der Form wesentlich.

Es ist mit Sicherheit nicht immer zu entscheiden, unter welche Rubrik ein Afterkristall zu stellen ist, da man seinen Bildungsgang nicht eindeutig kennt. In den folgenden Abschnitten sind einige Beispiele aus der unendlichen Fülle genannt.

4. Paramorphosen. Paramorphosen infolge molekularer Umwandlung, hervorgerufen durch Temperaturänderungen, kennt man bei enantiotrop-polymorphen Stoffen, wie z. B. beim Boracit ($Mg_7 Cl_2 B_{16} O_{30}$). Dieser tritt in regulären Formen auf, zeigt aber Zwillingsbildung und Doppelbrechung rhombischer Kristalle. Bei Temperaturen über 265 ° wird er einfach brechend. Ebenso verhält sich Leucit ($K Al Si_2 O_6$), der in regelmäßig ausgebildeten Kristallen (Ikositetraeder) auftritt. Er ist eine Paramorphose einer rhombischen Modifikation nach einer regulären, die erst über Temperaturen von ca. 700 ° stabil wird. Es läßt sich daraus der Schluß ziehen, daß Leucit über 700° entstanden sein muß. Hierher gehören auch die verschiedenen enantiotrop-dimorphen Modifikationen von $Si O_2$: Tridymit (hexagonale Kristallform bei optisch-rhombischer Symmetrie), Cristobalit (doppeltbrechend bei regulären Begrenzungsformen) und Quarz. Dieser zeigt bei 575 ° eine enantiotrope Umwandlung, die sich durch sprungweise Aenderung in der Stärke der Lichtbrechung und der Doppelbrechung dokumentiert. Bei höheren Temperaturen entstandener Quarz ist daher als Paramorphose (O. Mügge Neues Jahrb. f. Min. usw. Festband 1907 181) der gewöhnlichen trapezoedrisch-tetartoedrischen Form nach einer trapezoedrisch-hemiedrischen des hexagonalen Kristallsystems zu betrachten. Die Aenderung im Kristallgebäude und im optischen Verhalten ist gering, man kann hieran umgewandelte von nicht umgewandelten Quarzen nicht unterscheiden. Indessen werden durch die bei der Umwandlung auftretende Volumänderung in den sich abkühlenden Kristallen Spannungen hervorgerufen, die sich beim Aetzen äußern. Es treten an umgewandelten Quarzplatten beim Aetzen Sprünge auf (F. E. Wright und E. S. Larsen, Quarz als geologisches Thermometer. Zeitschr. f. anorg. Chem. **68** 361 1910). Bei Kristallen, deren Entstehungstemperatur tiefer lag, fehlen diese Erscheinungen. Die Unterscheidung der Paramorphose vom unveränderten Kristall gestattet auf die Bildungstemperaturen quarzführender Gesteine Schlüsse zu ziehen: Ader- und Mandelquarze und gewisse Pegmatitquarzmassen scheinen unter 575 ° gebildet zu sein, während die Quarze der Schrift- und Granitpegmatite, sowie Granit- und Porphyrquarze wahrscheinlich oberhalb 575 ° entstanden sind. Schwieriger ist der Nachweis einer reinen Paramorphose zu erbringen für die Mineralien, die monotrop dimorph sind. Von den drei bekannten Modifikationen des kristallisierten TiO_2 gehen durch Erhitzen auf hohe Temperatur Brookit wie Anatas in Rutil über. Rutil scheint daher die stabilste Modifikation bei niedrigen Drucken zu sein, so daß Pseudomorphosen von Rutil nach Brookit oder Anatas als Paramorphosen gelten können.

Wenn auch Beobachtungen vorliegen über Paramorphosen von Kalkspat nach Aragonit, welche durch Umwandlung infolge von Temperaturerhöhung gebildet sind, so wird doch die Mehrzahl als Umwandlungs-

pseudomorphosen oder Verdrängungspseudomorphosen zu deuten sein.

Einer Druckänderung scheinen Paramorphosen von Sillimanit nach Andalusit ihren Ursprung zu verdanken. F. Reinhold (Tschermaks Min. petr. Mitt. 26 147 1907) fand im Sillimanitgneiß des niederösterreichischen Waldviertels aus Andalusit hervorgegangenen Sillimanit. Bisweilen war der Andalusit völlig verdrängt durch Sillimanitfasern, die parallel zur Längserstreckung der Andalusitindividuen gelagert waren. Diese Paramorphose findet vielleicht eine Erklärung als Umbildung durch Druckerhöhung. Hierbei müßten sich Produkte von größerer Dichte bilden. In der Tat beträgt die Dichte des Sillimanits 3,25, während die des Andalusits 3,15 ausmacht. Indessen muß berücksichtigt werden, daß auch Temperaturerhöhung allein die Umwandlung Andalusit $\longrightarrow$ Sillimanit hervorruft.

Zu Paramorphosen sind auch wohl die Afterkristalle zu rechnen, die A. Pelikan (Tschermaks Min. petr. Mitt. 21 226 1902) als Entmischungspseudomorphosen von Magnetit + Rutil nach Ilmenit bezeichnet, denn es bleiben Form und chemischer Bestand unverändert.

Schließlich werden noch die Umwandlungsprodukte einiger Mineralien der seltenen Erden hierher gerechnet. Es zeigen Gadolinit, Orthit, Aeschynit und andere kompliziert zusammengesetzte Verbindungen mit seltenen Erden Ce, La usw. bisweilen kristallographische Begrenzungen, die nicht im Einklang stehen mit ihrem isotropoptischen Verhalten. W. Peterson (Geol. Fören Förhandl. Stockholm 12 275 1890) konnte nachweisen, daß der isotrope, wahrscheinlich amorphe Gadolinit von Ytterby chemisch identisch war mit dem doppeltbrechenden von Hitteroe. Durch Glühen geht jener in die kristallisierte Modifikation über. Wie die Bildung dieser Afterkristalle zu deuten ist, ist noch nicht ermittelt.

Zu nennen sind noch Cliftonit = Graphit nach Diamant in Meteoreisen; Zinnober nach Metacinnabarit; rhombischer Schwefel nach monoklinem.

5. **Umwandlungspseudomorphosen.** Entstehen die Umwandlungspseudomorphosen durch Verlust von Bestandteilen, so ist damit meist eine Lockerung des Gefüges verbunden. So erscheinen die Pseudomorphosen von Silberglanz nach Rotgültigerz wohl noch in der Form des zuletzt genannten, indessen ist die Schärfe der Kristalle verloren gegangen. Lösungen von Alkalisulfiden haben Antimon- oder Arsensulfid aus den Rotgültigerzen gelöst und fortgeführt. Der übrigbleibende Silberglanz kann selbst noch Schwefel verlieren, so daß schließlich Pseudomorphosen von gediegenem Silber nach Rotgültig übrigbleiben.

Wasserverlust kann eintreten durch einfaches Verwittern. Laumontit büßt leicht seinen Wassergehalt ein, wenn er der Luft ausgesetzt ist. Meist ist hiermit indessen auch eine Zerstörung der Kristalle verbunden, die aufgelockerte Substanz zerfällt zu Pulver. Entwässerung kann aber auch stattfinden durch Einwirkung von Lösungen auf Hydrate. Ist die Dampfspannung eines mit Lösung in Berührung stehenden Hydrats größer als die Tension der Lösung, so gibt es Wasser ab. So können schon bei tiefen Temperaturen Pseudomorphosen von Anhydrit nach Gips entstanden sein, wenn etwa Lösungen von Magnesiumchlorid oder Natriumchlorid wirksam waren.

Zu nennen sind noch folgende Umwandlungspseudomorphosen: Kalkspat ($CaCO_3$) nach Gaylussit $CaCO_3 . Na_2CO_3 . 5H_2O$; Bleikarbonat ($PbCO_3$) nach Phosgenit ($PbCO_3$ $PbCl_2$); Magneteisen (Fe_3O_4) nach Eisenglanz (Fe_2O_3). Aus den empirischen Formeln ergibt sich, welche Elemente fortgeführt werden; daß die Menge der zurückbleibenden Bestandteile hierbei ungeändert bleibt, ist unwahrscheinlich.

Seltener sind die Umwandlungspseudomorphosen durch Aufnahme von Bestandteilen. Hierher gehören die Oxydationsvorgänge, Hydratisierungen, Bildung von Schwefelverbindungen und Karbonaten. Die Stoffaufnahme ist meist mit Volumvermehrung verbunden. Bei der Umwandlung von Anhydrit in Gips liefert 1 Volum Anhydrit 1,623 Volumteile Gips. Die Afterkristalle zeigen häufig noch die Spaltbarkeit des Anhydrits. Durch Oxydation in kohlensäurehaltiger Lösung können Malachitpseudomorphosen nach Rotkupfererz ($Cu_2O, CuCO_3 . Cu(OH)_2$) entstehen. Die Pseudomorphosen Anglesit ($PbSO_4$) nach Bleiglanz PbS ist auf einen langsamen Oxydationsprozeß zurückzuführen.

Die in der Erdrinde zirkulierenden Lösungen sind aber meist so beschaffen, daß die Umwandlungsvorgänge mit Verlust und Aufnahme von Bestandteilen zugleich verbunden sind. In der Tat sind derartig gebildete Pseudomorphosen die bei weitem häufigsten. Hierher gehört die Serpentinisierung des Olivins in Gesteinen. Sie wird hervorgerufen durch Verlust von MgO und FeO unter Aufnahme von Wasser. Olivin ist außerdem noch mancherlei Umwandlungen fähig. So entstehen im Olivin der Lamprophyre des Plauenschen Grundes Hornblendekriställchen, die vom Rande aus nach innen vordrängen und bisweilen den ganzen Innenraum erfüllen (B. Doss in Tschermaks Min. Petr. Mitt. 11 51 1890, vgl. auch A. Uhlemann ebenda 28 436 1909). Erfüllt diese pili-

tische Hornblende den Kristall nicht vollständig, so treten in den Zwischenräumen Chlorit, Biotit, Talk und Magnetit auf. Den Gang dieser Verwitterung kann man mit Sicherheit noch nicht übersehen. Es ist möglich, daß die Mineralien der Nachbarschaft (Feldspäte) einen Einfluß ausgeübt haben, indem sie die Tonerde zur Biotitbildung lieferten; vielleicht spielen auch Druckeinflüsse eine Rolle.

Weitere mit Aufnahme von H_2O verbundene Pseudomorphosen nach kieselsäurehaltigen Mineralien sind Analcim nach Leucit, Speckstein nach Quarz, Glimmer nach Turmalin, Glimmer nach Cordierit. Im letzten Fall geschieht wohl die Bildung des Kaliglimmers auf Kosten der beiden Hauptgemengteile des Cordieritgneißes, indem die Zersetzung des Feldspats das Kali, die des Cordierits die kieselsaure Tonerde lieferte. Eisenoxydul und Magnesia wurden hierbei als Karbonate weggeführt.

Es gehören noch hierher Speckstein nach Dolomit; Brauneisenstein nach Eisenspat; Pyromorphit nach Cerussit.

6. Verdrängungspseudomorphosen. Zu dieser Gruppe scheinen z. T. die Pseudomorphosen von Kalkspat nach Aragonit zu gehören. So fand F. Sandberger (Neues Jahrb. f. Min. usw. 1872 529) im „Drusendolomit" der Lettenkohle von Oberwern bei Schweinfurt Afterkristalle, bei denen Form und Zwillingsbildung ursprünglicher Aragonitkristalle aufs schönste erhalten waren. Im Inneren waren sie angefüllt mit zahllosen fest aneinander haftenden Kalkspatkriställchen. Bisweilen bestand noch ein Aragonitkern. Der Unterschied der Dichte (Aragonit 2,95; Kalkspat 2,66) müßte, wenn weder Stoffzufuhr noch Abfuhr stattgefunden hätte, eine beträchtliche Volumvergrößerung bedingen. Indessen sind die Pseudomorphosen bisweilen teilweise hohl. Wahrscheinlich ist daher der leichter lösliche, weil instabile, Aragonit weggeführt worden und Kalkspat an seine Stelle getreten (vgl. hierzu M. Bauer Neues Jahrb. f. Min. usw. 1886 I 62f. 1890 I 12f.).

Interessante Verdrängungspseudomorphosen beobachtete K. A. Redlich (Tschermaks Min. Petr. Mitt. 17 521 1898) bei Cinquevalle in Südtirol. Hier wurden Flußspatkristalle wahrscheinlich durch Alkalikarbonate aufgeschlossen. Alkalifluorid wurde weggeführt und an Stelle von CaF_2 trat Calcit, der die neugebildeten Hohlräume ausfüllte. Bisweilen ist Flußspat auch noch teilweise erhalten. Der Kalkspat selbst wird ebenfalls im Verlauf des weiteren Umwandlungsprozesses aufgelöst und durch Quarz ersetzt, der die Spaltbarkeit des Kalkspats nachahmt. Er füllt den Raum der ursprünglichen Kalkrinde aus und wächst weiter zu einer Kristallgruppe. Das bisweilen noch freibleibende Innere wird von Zinkblende ausgefüllt.

Sehr häufig sind die Pseudomorphosen nach Kalkspat, indem schwerer lösliche Mineralien dessen Stelle einnehmen, wie Eisenspat, Bitterspat, Zinkspat u. a. Karbonate (vgl. hierzu M. Bauer Neues Jahrb. f. Min. usw. 1886 I 62f. 1890 I 12f.).

7. Umhüllungspseudomorphosen. Entsteht ein krustenförmiger Absatz einer anderen Substanz auf einem Kristall, so bezeichnet man diesen, wenn er den Kristall deutlich abbildet, als Umhüllungspseudomorphose. Meist ist diese Umkrustung auch der Anfang bei der Bildung einer Umwandlungs- oder Verdrängungspseudomorphose, wie E. Geinitz bei manchen Beispielen nachwies. In dem so umschlossenen Kristall gehen chemische Umsetzungen vor sich oder es wird die ursprüngliche Substanz herausgelöst, so daß ein Hohlraum entsteht, der nun wiederum durch ein beliebiges Mineral ausgefüllt werden kann. So bei einer Pseudomorphose von Kalkspat nach Cerussit (Grube Kantenbach bei Bernkastel). Diese Pseudomorphosen sind hohl, drusig, an den Kanten und Ecken abgerundet. Der Durchschnitt der Rinde zeigt in der Mitte eine papierdünne Bleiglanzlage. Wahrscheinlich wurde diese durch Sulfidlösungen auf dem primären Cerussitkristall niedergeschlagen, darauf setzte sich Kalkspat ab, der auch, nachdem das Bleikarbonat im Innern verschwunden war, einen Teil des Hohlraumes ausfüllte.

Meist liefert Quarz das Material zu diesen Krusten, die Kalkspat, Flußspat, Eisenspat, Schwerspat u. a. überziehen.

Wir haben es bei den Umhüllungspseudomorphosen nicht mit Umwandlungen der Mineralien zu tun, sondern mit einfachen Lösungs- oder Fällungserscheinungen. Daher bieten sie weniger Interesse als die übrigen Arten von Afterkristallen.

8. Künstliche Nachbildungen von Afterkristallen. Von großer Wichtigkeit für die Kenntnis der Afterkristalle sind deren künstliche Nachbildungen, da sie unsere Schlüsse zu kontrollieren gestatten und unbekannte Zwischenreaktionen kennen lehren. Es liegen indessen kaum vollständige, systematische Untersuchungen in dieser Hinsicht vor. Es genügt nicht Anfangs- und Endzustand eines umgewandelten Minerals zu untersuchen, man müßte auch die Veränderungen in der Lösung verfolgen, den Einfluß des Druckes und der Temperatur näher studieren. Interessante Umhüllungspseudomophosen stellte A. Knop (Zeitschr. f. Krist. 4 261 1880) dar, indem er Kristalle des leicht löslichen Eisenammoniakalauns in eine gesättigte Lösung von Tonerdeammoniakalaun brachte. Es wachsen alsdann

auf dem Impfkristall kleine Kristalle des schwerer löslichen Tonerdealauns zu einer einheitlichen festen Hülle zusammen. Dieser Vorgang ist wohl durch die Löslichkeitserniedrigung eines Salzes durch ein gleichioniges zu erklären. In einigen Fällen wurde der Impfkristall der Berührung mit der Lösung durch Umkrustung nach kurzer Zeit vollständig entzogen. Häufiger wird der Eisenammoniakalaun aufgelöst, so daß nur eine Hülle von Tonerdealaun übrig bleibt.

Läßt man, wie O. Mügge (Neues Jahrb. f. Min. usw. 1892 II 92) bemerkte, Kristalle des Doppelsalzes $MnCl_2.KCl.2H_2O$ an der Luft liegen, so nehmen sie Wasser auf unter Abscheidung von Chlorkalium, welches dann Pseudomorphosen nach dem Doppelsalz bildet. Hier liegt eine sich inkongruent lösende Verbindung vor, die sich ähnlich wie Carnallit in Berührung mit Wasser spaltet.

Hierher gehören Versuche am Koenenit, einem wasserhaltigen Aluminium-Magnesiumoxychlorid (F. Rinne Centralbl. f. Min. usw. 1902 493). Durch Behandeln mit verschiedenen Agentien können einzelne Stoffe entfernt werden, so daß Umwandlungspseudomorphosen durch Verlust von Bestandteilen entstehen. Nach vielstündigem Kochen mit H_2O verlor das Mineral alles Chlor, es behielt aber seine Blättchenform. In konzentrierter Salmiaklösung bestand nach hundertstündigem Kochen der Rückstand aus $Al_2O_3.2H_2O$. Diese $Al_2O_3.2\,H_2O$-Blättchen sehen äußerlich noch immer wie Koenenit aus; ein Zusammensturz des Kristallgebäudes hat nicht stattgefunden, sie zeigen unter dem Polarisationsmikroskop das Interferenzkreuz einaxiger Kristalle, allerdings jetzt von negativem Charakter. Diese optische Erscheinung bleibt selbst nach dem Glühen bestehen, so daß alsdann Pseudomorphosen von Al_2O_3 nach Koenenit vorliegen würden. Zeolithe zeigen ein ähnliches Verhalten, hier ist die nach dem Behandeln mit Säuren zurückbleibende Kieselsäure als Pseudomorphose nach einem Zeolith anzusprechen (F. Rinne Centralbl. f. Min. usw. 1902 594 f.). Heulandit, Brewsterit, Desmin und Harmotom liefern selbst nach Glühen der wasserhaltigen Kieselsäure SiO_2, bei dem die ursprüngliche Kristallbegrenzung erhalten bleibt.

Literatur. *Viele vereinzelte Angaben über Afterkristalle finden sich in folgenden Zeitschriften: Zeitschrift für Kristallographie und Mineralogie (Leipzig); Neues Jahrbuch für Mineralogie, Geologie und Paläontologie (Stuttgart); Mineralogische und petrographische Mitteilungen (Wien); Zeitschrift der deutschen geologischen Gesellschaft (Berlin); The mineralogical Magazine and Journal of the Mineralogical society of Great Britain and Ireland (London); Bulletin de la société française de mineralogie (Paris). — Von zusammenfassenden Werken sind zu nennen:* ***R. Blum,*** *Die Pseudomorphosen des Mineralreiches, Stuttgart 1843, nebst vier Nachträgen 1847, 1852, 1863 und 1879. —* ***G. Bischof,*** *Lehrbuch der chemischen und physikalischen Geologie, 2. Aufl., Bonn I 1863, II 1864. —* ***E. Geinitz,*** *Neues Jahrb. f. Min. usw., 1876, 449. —* ***Derselbe,*** *Tschermaks Min. Petr. Mitt., 1879, 489. —* ***J. Roth,*** *Allgemeine und chemische Geologie, I, Berlin 1879. —* ***R. Brauns,*** *Chemische Mineralogie, Leipzig 1896. — Vgl. auch die Abschnitte über Afterkristalle und Pseudomorphosen in den Lehrbüchern der Mineralogie und Petrographie.*

R. Nacken.

Agardh
Jakob Georg.

Botaniker. Geboren als Sohn des Botanikers Karl Adolph Agardh am 8. Dezember 1813 in Lund. Er wurde dort 1854 Professor der Botanik. Im Jahre 1879 trat er in den Ruhestand. Er starb in Lund am 30. Januar 1901. Unter seinen Arbeiten sind die über Algen die bemerkenswertesten, in denen er die Studien seines Vaters fortführte. Genannt seien nur die Algae maris mediterranei et adriatici (Paris 1842) und vor allem die Species, genera et ordines Algarum, von denen Band I die Fucoideen (Lund 1848) und Band II die Florideen (Ebendort 1851 bis 1863) behandelt.

W. Ruhland.

Agardh
Karl Adolph.

Botaniker. Geboren am 23. Januar 1785 zu Bådstad in Schonen als Sohn eines Kaufmannes. Er studierte in Lund und wurde 1807 daselbst Dozent der Mathematik. 1812 erfolgte seine Ernennung zum Professor der Botanik und Oekonomie. 1816 wurde er auch Pfarrer im St. Peterskloster zu Lund. Er erwarb sich, besonders als Mitglied des 1826 bis 1828 tagenden Erziehungskomités, um die Neugestaltung des schwedischen Erziehungswesens hohe Verdienste. In späteren Jahren, besonders seit er Abgeordneter zum Reichstage geworden war, beschäftigte er sich hauptsächlich mit Staatswirtschaft. 1834 wurde er zum Bischof von Karlstad erwählt, wo er am 28. Januar 1859 starb. Er stand in seinen allgemeinen Anschauungen ganz unter dem Einfluß der Naturphilosophie, hat sich aber durch seine Schriften über Algen um den Ausbau des Algensystems sehr verdient gemacht. Hier seien genannt seine Synopsis Algarum Scandinaviae (Lund 1817), die Species Algarum (Greifswald 1823 bis 1828 2 Bände), das Systema Algarum (Lund 1828), die Icones Algarum euro-

paearum (Leipzig 1828 bis 1835) und der Conspectus criticus Diatomacearum (Lund 1830 bis 1832).

W. Ruhland.

Agassiz
Alexander.

Geboren am 17. Dezember 1835 in Neufchatel in der Schweiz; gestorben am 28. März 1910 in Cambridge (Mass.). Sohn von Louis Agassiz. War von 1860 bis 1865 Assistent am Museum of Comparative Zoology in Harvard. Wandte sich dann aber industriellen Unternehmungen zu, und beteiligte sich an einer Kupfermine am Lake Superior, ohne aber je sein Hauptinteresse, die Zoologie, aus dem Auge zu lassen. Durch diese seine Nebenbeschäftigung erwarb er großes Vermögen, das er, als er später, 1874, wieder als Kurator in das Museum of Comparative Zoology eintrat, diesem in hochherziger Weise zugute kommen ließ. Seit 1902 war er Direktor des Museums, das er durch zoologische Sammlungen aus fast allen Erdteilen bereicherte. Agassiz hat an einer großen Reihe von Expeditionen teilgenommen; so unternahm er 1876 bis 1881 eine Tiefseeexpedition nach West-Indien. Außerdem war er Leiter von Expeditionen nach den Sandwich-Inseln, den Fiji-Inseln. dem Great Basin Reef von Australien, zur Landenge von Panama usw. Ein besonderes Verdienst erwarb er sich durch die Gründung der zoologischen Station in Newport (Rhode-Island). Seine wissenschaftlichen Arbeiten lagen auf dem Gebiete der Echinodermen, Quallen und Fische Amerikas; er bearbeitete ferner die Entwickelung einiger Fische, Würmer und Echinodermen und gab auch eine Reihe von Abhandlungen über die Tiefseefauna heraus. Seine hauptsächlichsten Arbeiten sind: Embryology of starfishes Boston 1865; North American acalephae Cambridge 1865; Marine animals of Massachusetts Bay 1879; Revision of the echini 1872 2 Bde; North American starfishes 1877; On the development of the flounders 1878; Young stages of osseous fishes 1878; Embryology of the Aenophora 1874; Three cruises of the U. S. coast and geodetic survey steamer Blake 1877 bis 1880, 1888 2 Bde. Mit seiner Mutter Elisabeth C. Agassiz schrieb er Seaside studies in natural history 1865 Neue Ausgabe Boston 1882.

Literatur. *Who's Who in America Vol. VI 1910. — Memoirs of the Museum of Comparative Zoology of Harvard College Cambridge (Mass.) 1910.*

W. Harms.

Agassiz
Louis.

Geboren am 28. Mai 1807 zu Mottier in der Schweiz; gestorben am 14. Dezember 1873 in ~~New~~-Cambridge. Er studierte in Zürich, Heidelberg und München vergleichende Anatomie, wurde 1831 Professor der Naturgeschichte in Neufchatel und siedelte 1846 nach Nordamerika über, wo er Professuren in Boston, Charlestone und zuletzt in ~~New~~-Cambridge für Zoologie und Geologie innehatte. Hier gründete er auch das Museum of Comparative Zoology und regte durch Popularisation der Naturgeschichte mit großem Geschick die Tradition an, große Summen für naturgeschichtliche Zwecke flüssig zu machen. Mit ebenso großem Erfolge sorgte er für die Organisation des Unterrichts und der wissenschaftlichen Arbeit. Seine wissenschaftlichen Arbeiten betrafen außer Echinodermen, Mollusken und Gletschern zunächst die fossilen Fische, ein Werk, das die klassischen Cuvierschen Arbeiten nach der Seite der Paläontologie der Wirbeltiere hin erweiterte. So ist Agassiz in gewisser Weise als Nachfolger Cuviers zu betrachten, wenn er sich auch wesentlich von ihm durch eine noch stärkere theosophische Färbung der Fassung der Konstanztheorie unterscheidet. Diese seine allgemeinen Ansichten legte er später hauptsächlich im Essay on Classification nieder. Für ihn war jede Art durchaus konstant und der Ausfluß einer Idee des Schöpfers, was um so merkwürdiger erscheint, als er sehr wohl den Parallelismus zwischen geologischer und embryologischer Reihenfolge der Tiere kannte. Durch seine schroffe Ablehnung des Darwinismus hat er dann auch dazu beigetragen, den Widerstand gegen die Entwickelungslehre zu verstärken. Von seinen Schriften sind hervorzuheben Recherches sur les poissons fossiles 5 Bde Neuchatel 1833/42; Études sur les glaciers Neuchatel 1840; Système glaciaire Paris 1847; Essay on classification London 1859; The structure of animal life New York 1866 Neue Auflage 1874.

Literatur. *Louis Agassiz, His life and correspondence edited by* ***Elisabeth C. Agassiz,*** *Boston 1885. Deutsch von Mettenius, Berlin 1886. —* ***Marcon,*** *Life letters and works of Louis Agassiz, London 1896, 2 Bde.*

W. Harms.

Aggregatzustände.

1. Einleitung. 2. Allgemeine Eigenschaften der Gase. 3. Allgemeine Eigenschaften der Flüssigkeiten. 4. Allgemeine Eigenschaften der festen Stoffe. 5. Uebergang aus dem gasförmigen in den flüssigen und aus dem flüssigen in den festen Zustand. 6. Der Molekularzustand der gasförmigen, flüssigen und festen Stoffe. 7. Kritische Erscheinungen: a) Entdeckung und Erklärung der kritischen Erscheinungen; b) Theoretische Folgerungen. Zustandsgleichung. Theorie der übereinstimmenden Zustände; c) Gasverflüssigung.

1. Einleitung. Die Einteilung der Materie in Aggregatzustände entspricht der grobsinnlichen Wahrnehmung. Wir finden diese Einteilung bereits bei den Philosophen der Alten. Ihre Elemente Feuer, Wasser und Erde waren nichts anderes wie Repräsentanten des gasförmigen, flüssigen und festen Zustandes. Auch heute noch ist diese Dreiteilung allgemein üblich, doch hat die neuere

chemische und physikalische Erkenntnis es notwendig gemacht, den Begriff des Aggregatzustandes an sich zu erweitern und den des festen und flüssigen Zustandes schärfer zu präzisieren als das durch den allgemeinen Sprachgebrauch geschieht. Die Gründe werden weiter unten eingehend dargelegt werden.

2. Allgemeine Eigenschaften des gasförmigen Aggregatzustandes. Die auffälligste Eigenschaft der Gase ist ihre Fähigkeit jeden ihnen dargebotenen Raum auszufüllen. Bringen wir verschiedene Gasmengen in gleiche evakuierte Gefäße, so werden sämtliche Gefäße von dem Gase vollständig ausgefüllt sein. Wie man sich leicht überzeugen kann, wird selbst bei einem sehr ausgedehnten Gefäß in außerordentlich kurzer Frist überall die gleiche Gaskonzentration herrschen. Dies zeigt uns, daß die Gase eine sehr große Beweglichkeit besitzen. Daß immerhin der Konzentrationsausgleich in Gasmassen eine gewisse Zeit in Anspruch nimmt, ist daraus zu ersehen, daß lokale Gasverdichtungen in einer freien Gasmasse möglich sind. Auf diesen Gasverdichtungen beruht die Möglichkeit des Fliegens.

Wenn verschiedene Gasmassen gleiche Räume stets vollständig ausfüllen, so ist notwendigerweise ihre Dichte in den einzelnen Gefäßen verschieden. Gleichzeitig können wir eine Verschiedenheit des von dem Gase ausgeübten Druckes beobachten. Es besteht demnach zwischen Gasdichte und Druck eine ganz bestimmte Beziehung.

Diese Beziehung ist von Boyle (1662) und von Mariotte (1679) ermittelt worden und lautet: Das Volum, d. i. also das Reziproke der Dichte, ist dem Druck umgekehrt proportional, oder was dasselbe besagt: das Produkt aus Druck und Volum eines Gases ist konstant.

Außer durch Druck kann das Volum eines Gases auch durch Temperaturänderung beeinflußt werden. Das Gesetz von Dalton (1801) und Gay-Lussac (1802) lehrt, daß die Ausdehnung, die ein Gas durch eine bestimmte Temperaturänderung erfährt, unabhängig von seiner Temperatur und von der Natur des Gases ist; sie beträgt stets pro Grad Temperatursteigerung $^1/_{273}$ seines Volumens bei 0°. Die Ausdehnung ist also recht beträchtlich. Bei der Temperatur — 273° (genauer — 273.09 nach Berthelot Z. f. Elektroch. 10 621 1904) würden daher alle Gase, wenn sie hier überhaupt noch als Gase existenzfähig wären, das Volum 0 haben. Diese Temperatur wird in der Physik zweckmäßig als Nullpunkt einer Temperaturskala benutzt, die als die absolute Skala bezeichnet wird. Die Beziehung zwischen Druck-Volum und Temperatur läßt sich nunmehr durch folgende einfache Formel ausdrücken

$$pv = RT$$

wo p den Druck, v das Volum, T die absolute Temperatur bedeuten. R ist eine Konstante, die für alle Gase den gleichen Wert besitzt.

Befinden sich mehrere Gase in einem Raum, so verhalten sie sich genau so, wie wenn jedes für sich allein in demselben enthalten wäre. Jedes von ihnen füllt den Raum vollständig gleichmäßig aus, nirgends besteht eine Scheidungsfläche zwischen den einzelnen Gasen, sie bilden ein homogenes Gebilde, d. h. also, alle Gase sind untereinander in allen Verhältnissen vollkommen mischbar.

Die Geschwindigkeit mit der die Mischung stattfindet, mit der also ein Gas einen bereits von einem anderen Gase ausgefüllten Raum einnimmt, ist wesentlich geringer als die, mit der es sich im Vakuum verteilt.

3. Allgemeine Eigenschaften des flüssigen Aggregatzustandes. Die Flüssigkeiten haben nicht mehr die Fähigkeit jeden ihnen dargebotenen Raum auszufüllen, ihre Dichte ist von dem Raum, der ihnen zur Verfügung steht, unabhängig. Wohl aber lassen sich die einzelnen Teile der Flüssigkeiten gegeneinander unter der Wirkung irgend einer Kraft, z. B. der Schwerkraft, verschieben. Der Widerstand, den eine Flüssigkeit dieser Verschiebung entgegensetzt, wird als innere Reibung bezeichnet (über Innere Reibung vgl. Hagen Pogg. Ann. 76 437 1839; Poiseuille ebenda 58 424 1843; ferner Neumann Arch. f. Anat. u. Phys. 1860 80). Je nach dem Grade der inneren Reibung können wir dünnflüssige, dickflüssige, tropfbar flüssige und zähflüssige Stoffe unterscheiden.

Während die ursprüngliche Definition Newtons für den flüssigen Zustand anführt, daß bei demselben die einzelnen Teilchen jeder Kraft weichen und sich dabei leicht aneinander vorbeibewegen, eine Definition, die auch dem gewöhnlichen Sprachgebrauch entspricht, erweist sich eine wissenschaftlich strenge Definierung des flüssigen Zustandes auf Grund des Grades der inneren Reibung als nicht durchführbar, und Newton selbst hat auch seinen Standpunkt später aufgegeben.

Besonders charakteristisch für Flüssigkeiten im Gegensatz zu den Gasen ist ihre Tendenz, frei in einem anderen Medium schwebend, eine besondere Form, nämlich Kugelgestalt anzunehmen (Oel in Wasser, Regentropfen). Diese Erscheinung beruht auf ihrem Bestreben ihre Oberfläche möglichst zu verringern. Man nennt diese Eigenschaft die Oberflächenspannung der Flüssigkeiten (vgl. Freundlich Capillarchemie Academ. Verlag Leipzig

1909 S. 3 ff.: ferner Ostwald Lehrbuch der Allgem. Chemie I 514 ff.; Winckelmann Handb. d. Phys. Bd. I² 1119). Sie ist verschieden für die verschiedenen Flüssigkeiten und für ein und dieselbe Flüssigkeit wiederum verschieden je nach der Natur des angrenzenden Mediums z. B. für Oel anders gegen Luft wie gegen Wasser.

Im Gegensatz zu den Gasen sind die Flüssigkeiten nicht stets in allen Verhältnissen löslich, sondern wir finden neben Löslichkeit in allen Verhältnissen, z. B. Wasser und Alkohol, Wasser und Schwefelsäure, Alkohol und Aether usw., teilweise Löslichkeit z. B. Wasser und Aether, Wasser und Phenol bis zu nahezu vollständiger Nichtmischbarkeit z. B. Wasser und Oel, Wasser und Quecksilber (vgl. Rothmund Löslichkeit und Löslichkeitsbeeinflussung in Bredigs Handb. d. angew. phys. Chemie Leipzig Joh. Ambros. Barth). Schüttelt man zwei solche teilweise mischbare Flüssigkeiten durcheinander, so trennen sie sich nach einiger Zeit wieder in zwei Schichten nach Maßgabe ihres spezifischen Gewichtes.

Im Gegensatz zu einer wahren Lösung, die in allen ihren Teilen homogen ist, bilden also solche nichtmischbare Flüssigkeiten ein heterogenes Gebilde.

Bisweilen kann eine Mischung äußerst innig sein, so daß sie dem bloßen Auge unter Umständen als homogen erscheint in Wahrheit aber dennoch heterogen ist (Emulsionen und bei noch weitgehenderer Verteilung Kolloide Lösungen). Im Gegensatz zu den Gasen ist das Volum der Flüssigkeiten vom Druck nur wenig abhängig, die Flüssigkeiten sind nur äußerst wenig komprimierbar so wenig, daß eine Komprimierbarkeit anfänglich überhaupt geleugnet wurde. Erst Oerstedt (Pogg. Ann. 9 603 1827) vermochte eine solche mit Sicherheit nachzuweisen. Eine sichere Gesetzmäßigkeit zwischen Druck und Kompression honnte nicht aufgefunden werden (Colladon und Sturm Ann. der chem. phys. 36 113 1827; Amagat C. v. 103 29 1886; Pagliani und Vicentini Beibl. 879 1884; Ritzel Z. phys. Ch. 60 320 1907). Der Grad der Komprimierbarkeit ist für die verschiedenen Flüssigkeiten verschieden (über Beziehung zwischen Komprimierbarkeit und Natur der Flüssigkeit vgl. Amagat Ann. ch. phys. 5 11 520 1877; Pagliani und Palazzo Beibl. 9 149 1885. Ueber Komprimierbarkeit und Oberflächenspannung vgl. Röntgen und Schneider Wied. Ann. 29 165 1886; van der Waals Over de continuiteit usw. S. 99; Ritzel l. c.).

Auch von der Temperatur ist das Volum der Flüssigkeiten wesentlich weniger abhängig als das der Gase, wenn auch fast durchgehends im gleichen Sinne. Eine Ausnahme macht bekanntlich das Wasser, dessen Volum bei + 4° ein Minimum besitzt, bei weiterer Abkühlung aber wieder zunimmt. Auch hier besteht keinerlei strenge Gesetzmäßigkeit für die verschiedenen Flüssigkeiten (über Wärmeausdehnung von Flüssigkeiten vgl. A. Winkelmann Handbuch der Physik Bd. III Wärme S. 81 ff.).

Die Eigenschaften der Flüssigkeiten und ganz ebenso die der Gase sind davon vollständig unabhängig, welchen Teil derselben man der Betrachtung unterzieht, vollkommen unabhängig ferner davon, in welcher Richtung man die Betrachtungen anstellt. Die optischen Eigenschaften (Lichtbrechung, Lichtabsorption) sowie die mechanischen Eigenschaften (Oberflächenspannung, innere Reibung, Ausdehnungskoeffizient, Elastizität, Wärmeleitfähigkeit) und schließlich die chemischen Eigenschaften (Reaktionsfähigkeit, Löslichkeit) einer Flüssigkeit sind unter allen Umständen die gleichen. Denken wir uns z. B. einen Würfel von Wasser (etwa durch Einfüllen in ein entsprechend geformtes Glasgefäß erhalten) so werden wir keinerlei Unterschied der optischen Eigenschaften beobachten können, gleichgültig in welcher Richtung wir hindurchsehen. Man bezeichnet diese Eigenschaft als Isotropie. Gase und Flüssigkeiten sind isotrop. Wir kennen aber auch zahlreiche feste Stoffe die isotrop sind. Ein Stück Glas z. B. hat in allen Richtungen in jeder Beziehung die gleichen Eigenschaften. Schneiden wir aus einem Glasklotz ein beliebig geformtes Stück in einer beliebigen Richtung, so werden die sämtlichen oben genannten Eigenschaften in allen Richtungen die gleichen sein. Die Entstehung solcher isotrop fester Stoffe wie z. B. des Glases ist im allgemeinen derselben Art. Wenn eine Flüssigkeit ziemlich rasch abgekühlt wird, so ändern sich ihre Eigenschaften stetig, die Viscosität oder innere Reibung nimmt dauernd zu, die Flüssigkeit wird allmählich zähe, syrupös, dehnbar und schließlich fest, ohne daß es möglich wäre, an der Aenderung irgend einer Eigenschaft festzustellen, wo der flüssige Zustand aufhört und wo der feste anfängt. Diese isotrop festen Stoffe dürfen daher nach ihrer ganzen Natur nicht zu den festen Stoffen gerechnet werden, sie sind Flüssigkeiten, haben alle für diese charakteristischen Eigenschaften und unterscheiden sich von diesen nur graduell durch eine wesentlich höhere innere Reibung, nicht aber prinzipiell.

Wegen ihres Hauptrepräsentanten des Glases pflegt man solche isotrope unterkühlte Flüssigkeiten auch allgemein als Gläser zu bezeichnen. Man erhält sie, wie bereits erwähnt, im allgemeinen durch rasche Abkühlung der Flüssigkeit (Schmelze), wo-

durch eine Kristallisation vermieden wird, doch gibt es auch zahlreiche Flüssigkeiten, die selbst bei recht langsamer Abkühlung isotrop glasig erstarren (vgl. hierzu Tammann Kristallisieren und Schmelzen S. 148 Leipzig Joh. Ambr. Barth 1903).

Außer durch Abkühlung von Flüssigkeiten kann man auch noch durch Fällung, also auf chemischem Wege, unter Umständen zu isotrop-festen Produkten gelangen, man pflegt solche Niederschläge meist als „amorph" zu bezeichnen. Da hier die Darstellung auf einem Umwege durch den gelösten Zustand hindurch erzielt wird, so ist es natürlich schwer, etwas näheres darüber auszusagen, ob der so erhaltene, istotrop feste Stoff die Fortsetzung einer unter Umständen nicht beständigen Schmelze darstellt oder nicht. Doch ist bisher kein Fall bekannt geworden, wo mit Sicherheit der identische Zustand durch Fällung und durch Abkühlung einer Schmelze erhalten wurde.

Es ist übrigens zu bemerken, daß die Anzahl der mit Sicherheit bekannten, durch Fällung erhaltenen amorphen Stoffe sehr gering ist. In den meisten Fällen handelt es sich bei den als amorph bezeichneten Niederschlägen nur um äußerst feinkristallinische Niederschläge, deren kristallinische Natur durch die Verbesserung der mikroskopischen Hilfsmittel in den meisten Fällen sichergestellt werden konnte.

Von den hier angeführten amorphen Niederschlägen sind streng zu trennen die gelatinösen (gallertigen) und kolloidalen Fällungen wie z. B. die Gallerten der Kieselsäure, des Eisen- und Tonerdehydrates u. a. m. Bei diesen ist der niederfallende Stoff zweifellos auch isotrop, doch ist er mit großen Mengen des Lösungsmittels beladen, das er durch bisher noch wenig bekannte Kräfte und in keineswegs irgendwie stöchiometrischem Verhältnis gebunden enthält. Ueber die Natur dieser Gallerten (Gele, Kolloide) ist noch zu wenig bekannt, als daß sie unter die Rubrik eines der drei Aggregatzustände mit irgendwelcher Berechtigung registriert werden könnten.

4. Allgemeine Eigenschaften der festen Stoffe. Die festen Stoffe besitzen ebensowenig wie die Flüssigkeiten die Fähigkeit einen ihnen dargebotenen Raum vollständig auszufüllen. Von den Flüssigkeiten unterscheiden sie sich dadurch, daß sie einer Formänderung d. h. einer Verschiebung der Teilchen gegeneinander einen wesentlich größeren Widerstand entgegensetzen.

Im allgemeinen wird nur eine mehr oder weniger bedeutende Kraft imstande sein, überhaupt eine Formänderung hervorzurufen. Vielfach wird eine Trennung der Teilchen leichter herbeizuführen sein als eine Verschiebung derselben gegeneinander. In diesem Fall nennt man den Stoff spröde, im ersteren weich oder plastisch.

Wie weiter oben dargetan wurde, sind die isotrop-festen Stoffe, die Gläser, ihrem ganzen Wesen nach dem flüssigen Aggregatzustand zuzurechnen. Dementsprechend werden dem festen Aggregatzustand ihrem Wesen nach nur anisotrope d. i. kristallisierte Stoffe angehören.

Bei diesen sind im Gegensatz zu den isotropen Stoffen sämtliche Eigenschaften in verschiedenen Richtungen verschieden.

Schleift man Prismen in verschiedenen Richtungen aus einem solchen anisotropen Stoff, so werden dieselben im allgemeinen verschiedene Doppelbrechung, verschiedene Lichtbrechung, verschiedene Lichtabsorption usw. aufweisen. Auch die Härte, die Elastizität und die chemischen Eigenschaften z. B. die Löslichkeit und Auflösungsgeschwindigkeit können in verschiedenen Richtungen merklich verschieden sein. Letzteres ersieht man am einfachsten daraus, daß eine aus einem solchen Kristall geschliffene Kugel bei der Behandlung mit einem Lösungsmittel ihre Kugelgestalt nicht beibehält. Die Kristalle sind also anisotrop und sind hierdurch prinzipiell von den isotropen Flüssigkeiten unterschieden.

Anisotrope Flüssigkeiten. Wir hatten bei den Flüssigkeiten gesehen, daß diejenige Eigenschaft, durch welche dieselben meist definiert werden, nämlich die innere Reibung, gerade zu einer Definition wenig geeignet ist, da diese alle Grade von höchster Dünnflüssigkeit bis zur Festigkeit des Glases annehmen kann, und daß vielmehr die Eigenschaft der Isotropie es ist, die uns ein präzises Charakteristikum bietet.

Umgekehrt ist auch kein logischer Grund dafür vorhanden, warum der anisotrope Zustand unbedingt an eine sehr hohe Viskosität geknüpft sein solle d. h. dem landläufigen Begriff „fest" entsprechen soll. Auch der Grad der Festigkeit oder der inneren Reibung sogenannter fester Stoffe kann weitgehenden Schwankungen unterworfen sein. Zwischen der inneren Reibung des metallischen Natriums oder des Bleis, die man mit dem Messer schneiden, oder durch eine Form pressen kann, und eines Diamanten, bei dem eine Verschiebung der einzelnen Teilchen fast ausgeschlossen erscheint, bestehen außerordentlich weitgehende Unterschiede. So ist es denn natürlich auch keineswegs undenkbar, daß sich eine noch viel geringere Widerstandsfähigkeit gegen Verschiebungseinflüsse, also eine noch wesentlich geringere Zähigkeit bei dem anisotropen Zustand vorfinden könnte. Dies trifft auch zweifellos zu: die sicher anisotropen Kristalle vieler Wachsarten sowie mancher ölsauren Salze

sind vollständig weich, entsprechen also keineswegs dem landläufigen Begriffe von „fest“. Immerhin müssen sie, da sie sich in keiner prinzipiellen Beziehung von den anderen anisotrop-festen Stoffen unterscheiden, dem „festen“ Aggregatzustand zugerechnet werden.

Es ist nun neuerdings auch eine bereits ziemlich große Anzahl von Stoffen bekannt geworden, die nach dem Grade der inneren Reibung ohne allen Zweifel zu den Flüssigkeiten gestellt werden müßten, da sie teilweise dünnflüssiger als Wasser sind, die aber in optischer Hinsicht zweifellos den Charakter anisotroper Stoffe zeigen. Diese Substanzen sind von O. Lehmann als *flüssige oder fließende Kristalle* bezeichnet und gedeutet worden. Ob diese Deutung zutrifft, scheint zwar noch nicht einwandfrei entschieden zu sein, einer entsprechenden Deutung sind schwerwiegende theoretische Bedenken entgegengesetzt worden (vgl. hierzu die Diskussionen zwischen Nernst und O. Lehmann, Ztschr. f. phys. Ch. 71 355 1910 und Z. f. Elektrochemie 16 702 1910). Der Möglichkeit aber, daß es anisotrope d. i. also kristallinische Stoffe geben solle, deren innere Reibung so gering ist, daß sie nicht mehr imstande sind, dem Einfluß irgendeiner Kraft z. B. der Schwerkraft unterworfen, die ihnen eigentümliche Form anzunehmen, d. h. uns als Kristalle zu erscheinen, können Bedenken prinzipieller Art nicht entgegengehalten werden.

Jedenfalls aber müssen diese Stoffe, wenn die Lehmannsche Deutung zu Recht besteht, dem festen Aggregatzustand zugerechnet werden.

Aus dem Gesagten mag hervorgehen, was schon eingangs betont wurde, daß die Trennung in „feste“ und „flüssige“ Aggregatzustände eigentlich unrichtig ist und zweckmäßiger durch die Begriffe „anisotrop“ und „isotrop“ ersetzt würde. Tammann (Kristallisieren und Schmelzen Leipzig 1903 S. 5) empfiehlt die übliche Einteilung in Aggregatzustände durch folgende Einteilung zu ersetzen:

Zustände

isotrop	anisotrop
1. gasförmig	Kristallzustand, verschiedene polymorphe Kristallarten
2. flüssig	
3. amorph	

in die letzte Rubrik kämen dann noch die „flüssigen Kristalle“.

Physikalische und optische Isotropie und Anisotropie. Die bisher geschilderte Art der Isotropie und Anisotropie wird auch vielfach als physikalische Isotropie und Anisotropie bezeichnet, weil hier sämtliche physikalischen (und chemischen) Eigenschaften in verschiedenen Richtungen verschieden sind.

Von dieser physikalischen Isotropie und Anisotropie streng zu unterscheiden ist die sogenannte optische Isotropie und Anisotropie.

Als optisch-isotrop werden die Kristalle des regulären Systems bezeichnet, bei denen die drei Elastizitätsachsen gleich sind und in denen daher eine Doppelbrechung des Lichtes *nicht* stattfinden kann, während die optisch einachsigen und zweiachsigen Kristalle, bei denen Doppelbrechung stattfindet, als optisch anisotrop bezeichnet werden.

Wie die Flüssigkeiten so sind auch die festen Stoffe im Vergleich zu den Gasen nur wenig durch Druck komprimierbar, und auch hier sind keine für alle festen Stoffe geltenden Gesetzmäßigkeiten bekannt geworden. Auch die thermische Ausdehnung der Stoffe ist relativ gering; sie ist für die meisten festen Stoffe der Temperatur annähernd proportional, ohne daß jedoch diese Proportionalität Anspruch auf strenge Gesetzmäßigkeit erheben könnte (Fizeau C. r. 58 923 1864 62 1101 1133 1866; Dulong und Petit Ann. d. chem. phys. 2 240 1816). Gesetzmäßige Beziehungen irgendwelcher Art zwischen dem Grade der thermischen Ausdehnung und der Natur des festen Stoffes sind nicht bekannt geworden.

Während bei den Gasen Mischbarkeit in allen Verhältnissen allgemein, bei den Flüssigkeiten häufig ist, ist die vollständige Mischbarkeit in festem Zustande relativ selten. Als solche in allen Verhältnissen mischbare feste Stoffe sind zumal die isomorphen und eutropischen Stoffe bekannt geworden.

Partielle Mischbarkeit ist häufig; in den weitaus meisten Fällen ist aber die Mischbarkeit praktisch gleich Null (van 't Hoff Ztschr. f. phys. Ch. 5 323; Bruni Ueber feste Lösungen Stuttgart 1901; Bodländer N. Jahrb. f. Min. Beil. B. 12 52 1899; Roozeboom Z. f. phys. Ch. 30 385 und 413).

Manche Stoffe besitzen die Eigenschaft, mit anderen zwar keine *Mischkristalle* zu bilden, aber parallel auf denselben sich abzuscheiden. Diese Fähigkeit der Parallelverwachsung dürfte aber wohl stets eine wenn auch unter Umständen nicht nachweisbare Mischbarkeit zur Voraussetzung haben. Diese Eigenschaft der Parallelverwachsung wird von O. Lehmann als *Heterotropie* bezeichnet.

Ueber die Oberflächenspannung der festen Stoffe ist z. Zt. nur wenig Sicheres bekannt, da sie infolge der Starrheit der Materie auf deren Ausbildung nur unter ganz bestimmten Bedingungen von wesentlichem Einfluß sein kann. Zweifellos aber ist wohl, daß sie wie alle anderen Eigenschaften in verschie-

denen Richtungen verschiedene Werte besitzen dürfte; es würde deshalb der feste Stoff niemals das Bestreben haben unter dem Einfluß der Oberflächenspannung Kugelgestalt anzunehmen, sondern es dürfte hier eine beliebige polyedrische Form als Gleichgewichtsform in Betracht kommen (Curie Bull. Soc. Acad. Fr. 8 145 1885; W. Gibbs Thermodyn. Studien. Uebers. v. W. Ostwald Leipzig 1892).

5. Uebergang aus dem gasförmigen in den flüssigen und aus dem flüssigen in den festen Zustand. Die Uebergänge aus einem Aggregatzustand in den anderen erfolgen im allgemeinen diskontinuierlich unter sprungweiser Aenderung aller Eigenschaften. Komprimiert man ein Gas z. B. Kohlensäure, so tritt bei einem ganz bestimmten Druck plötzlich Verflüssigung unter starker Kontraktion ein und von diesem Augenblick ab sind alle Eigenschaften des Stoffes deutlich verändert. Dennoch ist bei dem Uebergang vom gasförmigen in den flüssigen Zustand auch eine kontinuierliche Ueberführung möglich (s. Abschnitt 7).

Erhitzt man in einem Kolben ein Gas über seine kritische Temperatur und komprimiert es hierauf über seinen kritischen Druck, so bleibt alles gasförmig. Kühlt man nun aber unter die kritische Temperatur ab, so erweist sich der ganze Kolbeninhalt als flüssig, ohne daß in einem bestimmten Punkte eine diskontinuierliche Aenderung der Eigenschaften eingetreten wäre.

Aber auch unterhalb der kritischen Temperatur besteht ein isothermer kontinuierlicher Uebergang vom gasförmigen zum flüssigen Aggregatzustand, wenn auch praktisch eine solche kontinuierliche Ueberführung nicht möglich erscheint. Die Kontinuität ist von van der Waals durch seine berühmte Zustandsgleichung dargetan worden.

Diese Gleichung, die sich auf molekularkinetische Betrachtungen gründet, war ursprünglich dazu bestimmt, die bedeutenden Abweichungen von dem Gesetz von Boyle-Mariotte zu erklären, die die Gase bei sehr hohen Drucken zeigen. Sie genügte aber nicht nur dieser Anforderung aufs beste, sondern es gelang auch mit Hilfe derselben direkte Beziehungen zwischen dem gasförmigen und flüssigen Zustand aufzudecken.

Die Druck-Volumkurve besitzt unterhalb der kritischen Temperatur nach van der Waals die beistehende Form (Fig. 1).

Die Linie aα entspricht der Aenderung des Gasvolumens mit dem Druck bei konstant gehaltener Temperatur. Bei rascher Drucksteigerung läßt sich diese Linie noch über den Punkt α hinaus etwa bis zum Punkte x verfolgen. Im allgemeinen aber tritt im Punkte α partielle Verflüssigung ein und das Volumen nimmt bei konstantem Druck längs der gestrichelten Linie α-β-γ bis γ ab, wo alles flüssig ist. Bei weiterer Druck-

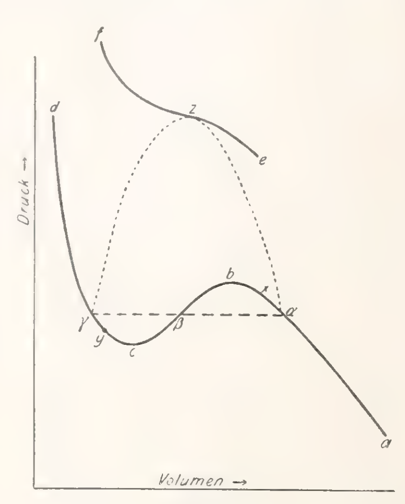


Fig. 1.

steigerung ändert sich das Volumen des nunmehr flüssigen Stoffes längs der Linie γd. Auch die Linie dγ läßt sich unter Umständen über γ hinaus, etwa bis zum Punkte y verfolgen. Der übrige Teil der Kurve y-c-β-b-x läßt sich dagegen nicht realisieren. Bei höheren Temperaturen rücken die drei Punkte γ, β, α immer näher aneinander und fallen bei der kritischen Temperatur in einen Punkt z zusammen. Oberhalb dieser Temperatur sind daher Gas- und Flüssigkeitszustand identisch geworden (Linie ezf).

Für den Uebergang aus dem flüssigen in den festen Zustand existiert bisher keine der van der Waalsschen analoge Gleichung, so daß wir zunächst auf Vermutungen angewiesen sind darüber, ob auch hier ein kontinuierlicher Uebergang möglich sei. Ausgesprochen worden ist diese Vermutung von einer Reihe namhafter Forscher, unter denen in erster Linie Planck und Poynting (Poynting Phil. Mag. [5] 12 32 1881; Planck Wied. Ann. 15 446 1882; derselbe, Vorles. über Thermodyn. S. 18 u. 152 1897; Ostwald Lehrb. d. Allgem. Ch. II 2 389), sowie W. Ostwald zu nennen sind (Ztschr. f. phys. Ch. 21 17 1896; Wied. Ann. 62 280 1897; 66 473 1898; 68 553 und 629 1899; Ann. Phys. 1 275, 2 1 u. 3 161 1900). Andererseits hat Tammann darauf hingewiesen, daß die Existenz eines solchen kontinuierlichen Ueberganges auch einen kritischen Punkt flüssig-fest postulieren würde. Tammanns experimentelle Untersuchungen, die sich bis zu recht erheblichen Drucken erstrecken, lassen aber die Existenz eines

solchen kritischen Punktes sehr unwahrscheinlich erscheinen.

Praktisch ist der Uebergang aus dem flüssigen in den festen Zustand, wenn wir unter letzterem stets nur den anisotrop-festen verstehen wollen, stets spontan und mit einer plötzlichen Aenderung aller Eigenschaften, zumal auch des Energieinhaltes, verknüpft. Der Uebergang aus dem flüssigen in den isotrop-festen Zustand dagegen, d. h. also das glasige Erstarren einer Schmelze, erfolgt stets ganz kontinuierlich, woraus ebenfalls hervorgeht, daß der isotrop-feste Zustand vom isotrop-flüssigen nur graduell, vom anisotropen dagegen prinzipiell unterschieden und mithin dem ersteren zuzurechnen ist. Auch die, als flüssige Kristalle gedeuteten, anisotropen Flüssigkeiten erfahren eine spontane Aenderung, indem sie bei einer ganz bestimmten Temperatur plötzlich isotrop werden. Dieser Punkt wird als der Schmelzpunkt der flüssigen Kristalle bezeichnet.

6. Ueber den Molekularzustand der gasförmigen, flüssigen und festen Materie. Die kinetische Molekulartheorie (vgl. hierzu O. E. Meyer Kinetische Theorie der Gase Breslau 1895 2. Aufl.; Boltzmann Gastheorie I und II Leipzig 1895 und 1898; Clausius Mechanische Wärmetheorie III Braunschweig 1899—1891) nimmt den gasförmigen Zustand als bedingt an durch eine rasche geradlinige Bewegung der Moleküle. Die Geradlinigkeit ihrer Bewegung wird nur geändert durch den Zusammenstoß mit anderen Molekülen oder mit der Wand des Gefäßes. Auf Grund einfacher Bewegungsgleichungen lassen sich aus dieser Auffassung die Gesetze von Boyle-Mariotte, Gay-Lussac und die Regel von Avogadro ableiten. Diese letztere besagt bekanntlich, daß in gleichen Räumen eines Gases gleich viele Moleküle enthalten seien. Dadurch ist es möglich, einfach durch Messung der Dampfdichte (des spezifischen Gewichtes eines Gases) bei gegebenem Druck und gegebener Temperatur sich Klarheit über die relative Größe der Moleküle in Dampfzustand zu verschaffen. Es hat sich nun ergeben, daß weitaus die meisten Gase aus sehr einfachen Molekülen bestehen. Die Moleküle der elementaren Gase sind fast ausnahmslos aus zwei Atomen zusammengesetzt (H_2, O_2, N_2, usw.), während die chemisch komplexeren Gase im allgemeinen der einfachsten chemischen Formel entsprechen (CO_2, CO, NH_3, CH_4 usw). Immerhin sind auch Fälle komplexerer Moleküle bekannt geworden. So enthält das Stickstoffdioxydgas NO_2 bei tieferen Temperaturen zunehmende Mengen von Tetroxyd $(NO_2)_2$ beigemengt und das Sauerstoffatom bildet außer dem Sauerstoffmolekül auch das komplexere Ozonmolekül (O_3). In allen den Fällen, wo „Assoziation“ bei Temperaturänderung in Gasen stattfindet, erfolgt diese allmählich d. h. es entspricht jeder Temperatur ein ganz bestimmtes Gleichgewicht zwischen assoziierten und nicht assoziierten Molekülen.

Die van der Waalssche Gleichung, die sich, wie bereits erwähnt, ja gleichfalls auf die molekularkinetische Auffassung gründet, zeigte uns, daß zwischen dem flüssigen und gasförmigen Zustand ein kontinuierlicher Uebergang besteht. Es ist daher ohne weiteres berechtigt, die molekularkinetische Auffassung auch auf den flüssigen Aggregatzustand zu übertragen, nur überwiegen hier die zwischen den Molekülen bestehenden anziehenden Kräfte gegenüber der freien Bewegungsenergie, so daß die Flüssigkeitsmoleküle sich nicht freiwillig voneinander zu entfernen vermögen. Es wäre aber unrichtig, ohne weiteres lediglich aus dem kontinuierlichen Uebergang zwischen dem gasförmigen und flüssigen Zustand nun auch auf eine gleiche Molekulargröße in denselben schließen zu wollen. Es findet sich eine Anzahl von Stoffen, die bereits im gasförmigen Zustand mehr oder weniger ausgesprochene Polymerisation zeigen und in einzelnen dieser Fälle wächst die Polymerisation mit zunehmender Dichte. Ja es erscheint keineswegs unberechtigt in weitaus den meisten oder sogar in allen Gasen neben überwiegend normalen auch vereinzelte komplexe Moleküle anzunehmen. Die Zahl derselben könnte natürlich bei zunehmendem Druck wachsen und längs dem nicht realisierbaren Kurvenstück $\alpha\beta\gamma$ recht beträchtliche Werte annehmen und dann im flüssigen Zustand bei weiter gesteigertem Druck noch mehr wachsen. Es ist aber zu bedenken, daß die van der Waalssche Formel nur dann Gültigkeit beanspruchen kann, wenn eine Aenderung der Molekulargröße des Mediums nicht statthat. Das Zutreffen dieser Formel nun für die meisten hoch komprimierten Gase läßt den Schluß zu, daß bei denselben eine merkliche Polymerisation durch Druck nicht erfolgt. Gibt die van der Waalssche Formel nun auch das Verhalten des verflüssigten Stoffes befriedigend wieder, so müssen wir auch für den Molekularzustand der betreffenden Flüssigkeit einen analogen Schluß ziehen. Wir sind also berechtigt mit ziemlicher Sicherheit die Frage zu beantworten, ob ein bestimmter Stoff im flüssigen Zustand sich polymerisiert oder nicht. Eine auf theoretischer Grundlage beruhende Methode zur Ermittelung des Grades der Assoziation im flüssigen Zustand ist dagegen nicht bekannt. Es ist aber von Eötvös (Wied. Ann. 27 452 1886) und später von Ramsay und Shields (Ztschr. f. phys. Ch. 12 433 1893) auf empi-

rischem Wege eine Beziehung zwischen der Aenderung der Oberflächenspannung mit der Temperatur und der Molekulargröße ermittelt worden. Danach besitzen die meisten Flüssigkeiten normales Molekulargewicht wie die entsprechenden Gase, während gewisse Körperklassen namentlich organische Säuren, Alkohole, das Wasser und zahlreiche anorganische Salze in geschmolzenem Zustande (Walden Ztschr. f. Elektrochemie 14 713 1908) aus komplexen Molekülen bestehen dürften. Die empirische Natur der Gleichung bringt es mit sich, daß die Deutung der auf Grund derselben erhaltenen Resultate nicht absolut einwandfrei ist.

Für den Molekularzustand der anisotrop-festen Materie sind wir fast ganz auf Vermutungen angewiesen. Die kinetische Molekulartheorie stellt sich die Moleküle im festen Zustand als um bestimmte Zentren in bestimmten Richtungen schwingend vor, durch die Art dieser Schwingungen wären die kristallinischen Eigentümlichkeiten des betreffenden Stoffes bedingt (Boltzmann).

Ueber die Molekulargröße im festen Zustand ist nichts Sicheres bekannt. Es ist wohl denkbar, daß mit der weiteren Abnahme der inneren Energie gegenüber dem flüssigen Zustand noch ein weitaus stärkeres Ueberwiegen komplexer, teilweise vielleicht hochkomplexer Moleküle verknüpft ist.

Einen gewissen Anhalt für die Richtigkeit dieser Annahme bietet uns die bei den festen Stoffen häufige Erscheinung der Polymorphie.

Während nämlich bei den Gasen und den Flüssigkeiten die Tatsache, daß chemisch gleich zusammengesetzte Stoffe charakteristisch verschieden sind, bei chemisch einfacheren Molekülen relativ selten angetroffen wird (Ozon, Stickstofftetroxyd, flüssiger Schwefel) und hier stets durch Polymerisation (Assoziation von Molekülen) erklärt werden kann, und nur bei den komplizierteren organischen Molekülen häufig ist und hier entweder durch Polymerie oder durch Isomerie (verschiedene Anordnung der Atome im Molekül) bedingt ist, ist bei den anisotrop-festen Stoffen diese Erscheinung fast die Regel (Polymorphie), und selbst die chemisch einfachsten Stoffe, die Elemente, sind fast durchweg in mehreren polymorphen, oder wie man es bei Elementen auch nennt allotropen Formen bekannt.

Die Polymorphie ist prinzipiell von der oben genannten Isomerie und Polymerie nicht verschieden (vgl. O. Lehmann Molekularphysik 1889 II 405 ff.; K. Schaum Die Arten der Isomerie. Habilitationsschrift Marburg 1897); wir können sie nur erklären durch eine verschiedene Größe der Moleküle, oder durch eine verschiedene räumliche Anordnung der Einzelmoleküle im Komplexmolekül. Ob es sich bei festen polymorphen Stoffen um Isomerie oder Polymerie handelt, kann unter Umständen entschieden werden (vgl. Heydrich Ztschr. f. Krystallogr. 48 243 1910).

Die Tatsache, daß bei Gasen und bei Flüssigkeiten die assoziierten Moleküle neben den einfachen oder zwei isomere Formen nebeneinander über ein größeres Temperaturintervall bestehen können, während die polymorphen Formen eines Stoffes im allgemeinen nur in einem einzigen Punkte, dem Umwandlungspunkt, nebeneinander bestehen, ist kein Widerspruch gegen die Behauptung, daß hier verwandte Erscheinungen vorliegen. Sie erklärt sich einfach auf Grund der Phasenregel aus der Tatsache, daß in den beiden ersten Fällen vollständige oder teilweise gegenseitige Löslichkeit der beiden Formen besteht, während die polymorphen Formen eines festen Stoffes im allgemeinen ineinander praktisch unlöslich sind. Doch sind auch beim festen Zustand vereinzelte Fälle bekannt geworden, wo zwei polymorphe Formen miteinander mischbar sind (Selen, vermutlich auch Tellur) und in diesen Fällen fehlt der Umwandlungspunkt und die beiden Formen sind über ein größeres Gebiet nebeneinander im Gleichgewicht.

Ueber das Molekulargewicht der Stoffe in verdünnter fester Lösung läßt sich eher etwas Positives aussagen; auf diese scheinen die van 't Hoffschen osmotischen Gesetze der verdünnten Lösungen mit gewissen Beschränkungen anwendbar zu sein (vgl. hierzu van 't Hoff Ztschr. phys. Ch. 5 322 1890; van Bijlert Ztschr. phys. Ch. 8 343 1891; Beckmann Ztschr. phys. Ch. 22 609 1897; Bodländer N. Jahrb. f. Min. Beil. Bd. 12 25 1898).

Literatur. ***van der Waals,*** *Kontinuität des gasförmigen und flüssigen Zustandes. Deutsch von F. Roth, II. Aufl., Leipzig 1899.* — ***O. Lehmann,*** *Molekularphysik, Leipzig 1888.* — ***G. Tammann,*** *Kristallisieren und Schmelzen, Leipzig 1903.* — ***J. H. van't Hoff,*** *Vorlesungen über theoretische und physikalische Chemie, Braunschweig 1903.* — ***W. Nernst,*** *Theoretische Chemie, 6. Aufl., Stuttgart 1909.*

R. Marc.

7. Kritische Erscheinungen. 7a) Entdeckung und Erklärung der kritischen Erscheinungen. Cagniard de la Tour erhitzte in einer zugeschmolzenen Glasröhre eine Flüssigkeit, die die Röhre nur zum Teil anfüllte, über der sich also gesättigter Dampf unter dem der jeweiligen Temperatur entsprechenden Dampfdruck befand. An dem Flüssigkeits-

spiegel konnte man die Grenze zwischen Flüssigkeit und Dampf erkennen. Beim Steigern der Erhitzung wurde der Meniskus flacher und mit einem Male verschwand die Grenze zwischen Flüssigkeit und Dampf völlig. Die Röhre war mit einer homogenen Masse erfüllt. Beim Abkühlen der Röhre trat der Meniskus bei der gleichen Temperatur wieder in Erscheinung, bei der er verschwunden war. Der plötzliche Uebergang von Flüssigkeit und Dampf in eine homogene Masse stellt einen neuen Zustand der Materie dar, den man den Cagniard de la Tourschen Zustand nennt.

Eine Klärung dieser Erscheinung erzielte zuerst Th. Andrews im Jahre 1867 und zwar durch Versuche mit Kohlensäure. Er schloß Kohlensäure in einer oben zugeschmolzenen Kapillare unten durch Quecksilber ab, und brachte dieses Rohr in einen Preßzylinder, in dem er durch Einschrauben eines Stempels den Druck beliebig erhöhen und dadurch das Quecksilber in der Kapillare hinauftreiben konnte. Die Temperatur hielt er während seines Versuches durch ein Wasserbad konstant; den Druck maß er durch ein Luftmanometer, das Volumen durch vorheriges Kalibrieren der Kapillare. Seine Ergebnisse stellten das Verhalten der flüssigen und der gasförmigen Kohlensäure bei konstanter Temperatur fest und zeigen die Abhängigkeit des Volumens vom Druck. Beistehende Figur 1 gibt das Andrewssche Diagramm wieder.

Bei Druckerhöhung nimmt also das Volumen des Gases rasch ab, bis der durch die Versuchstemperatur bestimmte Dampfdruck des gesättigten Kohlensäuredampfes erreicht ist. Bei weiterem Verringern des Volumens beginnt ein Teil des Dampfes sich zu kondensieren und der Druck nimmt nicht mehr weiter zu, bis aller Dampf verflüssigt ist; von da ab kann durch sehr starke Erhöhung des Druckes nur noch eine ganz geringe Volumenverringerung der Flüssigkeit erzielt werden.

Der Teil dieser Isothermen, der im Sättigungsgebiet liegt, nimmt mit steigender Temperatur immer mehr ab, bis er endlich ganz verschwindet. Dort findet ein kontinuierlicher Uebergang des gesättigten Dampfes in Flüssigkeit statt. Diese Erscheinung fand Andrews für Kohlensäure bei der 30,9 °-Isotherme, die er deshalb die kritische Isotherme nannte. Die zugehörige Temperatur ist die kritische Temperatur, die Andrews als jene definiert, bei der ein Unterschied zwischen Gas und Dampf auftritt; denn oberhalb dieser Temperatur ist ein gesättigter Dampf und eine Verflüssigung auch bei noch so hohen Drucken nicht möglich.

Verbindet man die Punkte im Andrewsschen Diagramm, bei denen die Kondensation beginnt und bei welchen sie völlig beendet ist, so ergibt sich eine in Figur 1 gestrichelte geschlossene Kurve, die sogenannte Grenzkurve, die an der Berührungsstelle mit der kritischen Isotherme ein Maximum hat.

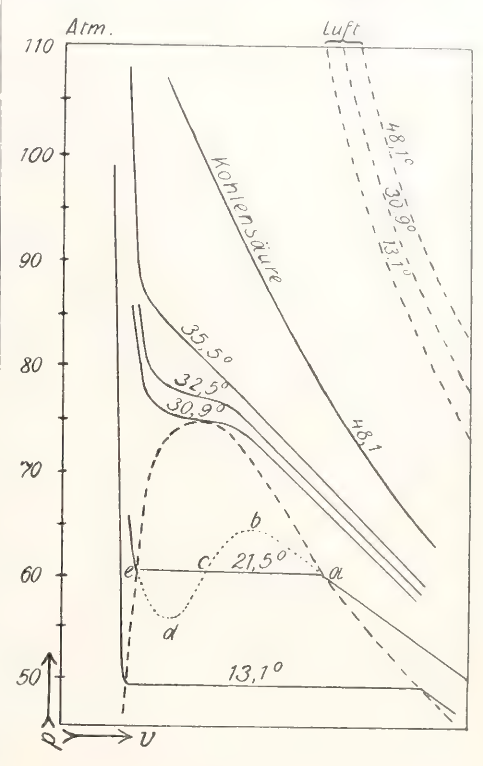


Fig. 1.

Diesen Berührungspunkt nennt man den kritischen Punkt; er ist offenbar derselbe, bei dem die oben beschriebene Cagniard de la Toursche Erscheinung auftrat. Dort herrscht die kritische Temperatur, oberhalb deren eine Flüssigkeit nicht mehr existenzfähig ist. Der dieser Temperatur entsprechende Sättigungsdruck heißt der kritische Druck. Er ist der größte Druck, unter dem gesättigter Dampf möglich ist. Das Volumen, das der kritischen Temperatur und dem kritischen Druck zugeordnet ist, heißt das kritische Volumen; Flüssigkeitsvolumen und Dampfvolumen sind beim kritischen Punkt identisch.

Das Andrewssche Diagramm gestattet eine präzise Differenzierung der Begriffe Dampf und Gas. Das Zustandsgebiet rechts von der kritischen Kurve repräsentiert den Gaszustand; überschreiten wir die kritische Kurve oberhalb des Berührungspunktes mit der Grenzkurve, so führen wir das Gas direkt, ohne Heterogeni-

tätserscheinungen, in die Flüssigkeit über und umgekehrt. Das Gebiet zwischen dem rechten Ast der Grenzkurve und der kritischen Kurve stellt den Zustand des ungesättigten Dampfes dar. Die Grenzkurve umschließt das Gebiet für die Koexistenz von gesättigtem Dampf und Flüssigkeit. Links von der kritischen Kurve und der linken Hälfte der Grenzkurve schließlich liegt das Gebiet der Flüssigkeit.

Hier sei noch einer Erscheinung Erwähnung getan, die im kritischen Punkt auftritt, der sogenannten kritischen Trübung. Schon Andrews bemerkte in der Nähe des kritischen Punktes eine Schlierenbildung, die auch von anderen Forschern erkannt und teilweise als Beweis gegen die Gültigkeit der Kontinuität des gasförmigen und flüssigen Zustandes angesehen wurde. Neuere Untersuchungen haben jedoch ergeben, daß diese Erscheinung mit der Andrewsschen Theorie wohl vereinbar ist und Smoluchowski hat auf Grund von Wahrscheinlichkeitsrechnungen gezeigt, daß in der Nähe des kritischen Punktes die Wahrscheinlichkeit von Dichtigkeitsunterschieden sehr groß ist, so daß hierdurch die Erklärung der kritischen Trübung, die schon Andrews gab, bestätigt wird.

Aus Andrews Kurven ersieht man, daß unterhalb des kritischen Punktes zu einem Druck zwei Volumen, das des gesättigten Dampfes und das der Flüssigkeit gehören.

James Thomson stellte bei Erwägung dieser Resultate die Hypothese auf, daß sich die Isothermen durch kontinuierliche Kurven dritter Ordnung darstellen lassen müßten, die unterhalb des kritischen Punktes 3 reelle, oberhalb nur 1 reelle Wurzel hätten. Im Sättigungsgebiet ersetzt also die Thomsonsche Anschauung die Gerade durch eine wellenförmige Linie, die in Figur 1 punktiert eingetragen ist.

Zu gleichen Ergebnissen kommt, wie nachher gezeigt wird, van der Waals auf Grund molekulartheoretischer Erwägungen bei der Aufstellung der nach ihm benannten Zustandsgleichung.

7b) Theoretische Folgerungen. Zustandsgleichung. Theorie der übereinstimmenden Zustände. Da das Boyle-Mariottesche Gesetz unterhalb und in der Nähe des kritischen Punktes keine Gültigkeit besitzt, war man vielfach bemüht, eine Gleichung der Gase zu finden, die dem wirklichen Verhalten derselben mehr entspricht. Eine solche Gleichung, die noch den Vorzug besitzt, daß sie sowohl für Gase als auch für Flüssigkeiten Geltung hat, wurde von van der Waals 1873 aufgestellt. Sie unterscheidet sich von der Gleichung der sogenannten idealen Gase durch zwei Konstanten, die den Einfluß des Volumens und der sogenannten Molekularattraktion berücksichtigen sollen.

Wie nämlich leicht einzusehen ist, kann die Gleichung $pv = RT$ für sehr hohe Drucke keine Gültigkeit mehr haben, denn dies würde bedeuten, daß sich das Volumen mit steigendem Druck dem Nullwert nähert, eine Annahme, die unseren Auffassungen von der Erhaltung des Stoffes widerspricht. Durch Einführung einer Konstanten „b“ trug van der Waals dem unzusammendrückbaren Eigenvolumen der Moleküle Rechnung und zwar in der Form $p\,(v-b) = RT$.

Andererseits lassen sich bei mittleren Drucken die Gase leichter komprimieren als das Boylesche Gesetz angibt; diese Erscheinung erklärt man sich durch die Hypothese von einer gegenseitigen Attraktion der Moleküle, durch die ein Molekulardruck entsteht, der den äußeren Druck unterstützt. Da diese molekulare Anziehung der Dichte der anziehenden und der angezogenen Gasteilchen also dem Quadrat der Dichte direkt und dem Quadrat des Volumens entgegengesetzt proportinal ist, so trägt van der Waals dieser Erchseinung Rechnung durch den Ausdruck $p + a\,\frac{1}{v^2}$, so daß seine Zustandsgleichung die Form erhält

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v-b) = RT$$

Die Gleichung enthält also drei Konstanten a, b und R, die für jedes Gas verschieden sind und experimentell z. B. durch Beobachtung einer Reihe von Isothermen bestimmt werden müssen.

Vergleicht man nun die Werte, die sich aus der Gleichung von van der Waals ergeben mit den Beobachtungen von Andrews, so finden wir sie mit denselben in voller qualitativer Uebereinstimmung, mit Ausnahme ihres Verhaltens im Sättigungsgebiet. Hier ergibt die Gleichung für die Isothermen die wellenförmige Linie, die schon J. Thomson erwartet hat, während Andrews' Isothermen sich von der Sättigungslinie an bis zur völligen Verflüssigung als eine Gerade parallel zur Abscissen-Achse darstellen. Maxwell und Clausius haben thermodynamisch bewiesen, daß sich die Kurve dritter Ordnung im Kondensationsgebiet durch eine der x-Achse parallele Gerade ersetzen läßt, welche mit der Isotherme zwei gleiche Flächenstücke bild t.

Von dem Thomsonschen wellenförmigen Kurvenstück abcde sind nun die den Stücken ab und ed entsprechenden Zustände tatsächlich realisierbar. Man kann nämlich einen Dampf über seinen Sättigungspunkt hinaus komprimieren, ohne daß Kondensation eintritt, d. h. den Dampf übersättigen;

das würde dem Kurvenstück a b entsprechen. Analog gelingt es, eine Flüssigkeit unter einem Druck zu erhalten, der unterhalb ihres der betreffenden Temperatur entsprechenden Dampfdruckes liegt, d. h. die Flüssigkeit überhitzen. Derartige homogene **metastabile** Zustände („Ueberschreitungserscheinungen") sind nur bei Abwesenheit der anderen Phase möglich; wird diese zugeführt, so stellt sich sofort ein der horizontalen Linie a c e angehörendes heterogenes Gebilde her. Die dem Kurvenstück b c d entsprechenden Zustände können überhaupt nicht hergestellt werden; es müßte ja im Gebiet d c b mit steigendem Druck das Volum zunehmen, also der Druck selbst unbegrenzt weiter wachsen.

Die van der Waals'sche Gleichung entspricht nun zwar nicht vollkommen dem wirklichen Verlauf der Zustandsänderung von Gas und Flüssigkeit, sondern stellt nur eine Annäherung dar. Besonders ist b keine Konstante, sondern von Druck und Temperatur abhängig, wie Clausius und andere gezeigt haben. Doch ist die Uebereinstimmung hauptsächlich auch im Flüssigkeitsgebiet so weitgehend und der Bau der Gleichung so einfach, daß dieselbe eine weite Anwendung gefunden hat. Nimmt man diese Gleichung als richtig an, dann lassen sich mit ihrer Hilfe die kritischen Stücke einer Materie bestimmen, wenn man die Konstanten a und b kennt, oder es lassen sich diese Konstanten aus den kritischen Stücken berechnen. Dies geschieht durch die Bedingung, daß diese Gleichung vom dritten Grade ist und im kritischen Punkt drei gleiche Wurzeln haben muß. Man erhält dann für die drei kritischen Daten v_k, p_k, und T_k folgende Beziehungen: $v_k = 3b$; $p_k = \frac{a}{27\,b^2}$

$RT_k = \frac{8\,a}{27\,b}$. Die dritte Konstante R läßt sich aus der Annahme berechnen, daß das Boyle-Mariottesche Gesetz $pv = RT$ bei sehr großen Volumen richtig ist: R ist also die Gaskonstante des idealen Gases.

Eine interessante Umformung hat van der Waals mit seiner Gleichung vorgenommen, indem er Druck, Volumen und Temperatur in Bruchteilen des kritischen Drucks, des kritischen Volumens, der kritischen Temperatur ausdrückte.

Bezeichnen wir mit van der Waals das Verhältnis $\frac{p}{p_k} = \pi$ als reduzierten Druck, $\frac{v}{v_k} = \varphi$ als reduziertes Volumen, $\frac{T}{T_k} = \tau$ als reduzierte Temperatur, so geht die Gleichung über in die sogenannte reduzierte Zustandsgleichung:

$$\left(\pi + \frac{3}{\varphi^2}\right)(3\varphi - 1) = 8\tau$$

Da diese Gleichung keine Konstante enthält, die von der jeweiligen Substanz abhängig ist, so gilt sie in unveränderter Form für alle Substanzen, sowohl Gase als auch Flüssigkeiten. Bei graphischer Darstellung kann daher das Verhalten aller Substanzen durch ein einziges Diagramm zum Ausdruck gebracht werden. Entsprechend den verschiedenen Werten, welche die kritischen Daten für verschiedene Substanzen besitzen, entsprechen natürlich gleiche Werte der reduzierten Koordinaten verschiedenen Absolutwerten von v, p und T (vgl. unten Figur 2).

Amagat hat das Verhalten einer Reihe von Gasen untersucht und in pv — p Diagrammen dargestellt, die er durch optische Aenderung der Diagramm-Maßstäbe zur Uebereinstimmung bringen konnte. Dadurch hat die Theorie der übereinstimmenden Zustände eine vortreffliche Bestätigung gefunden. Unser Diagramm 2 zeigt die vorzügliche Uebereinstimmung der pv — p Diagramme von Luft, CO_2 und Aether, wie sie Amagat gefunden hat.

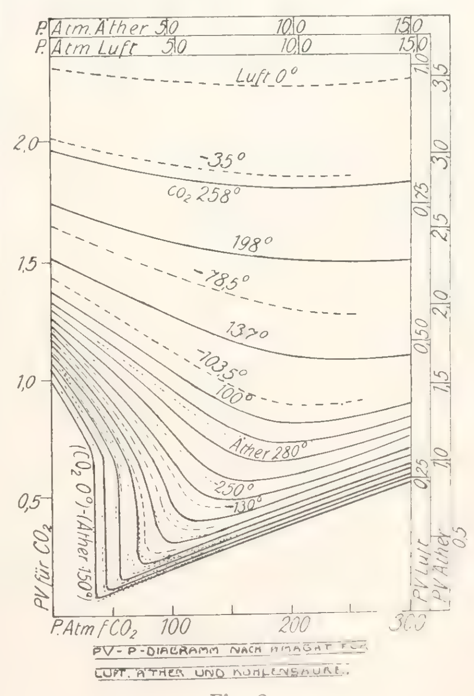


Fig. 2.

Die Darstellung der Zustandgleichung in einem zweiachsigen Diagramm ist allgemein üblich geworden. Diese Diagramme, sei es nun ein Druck-Volumen-Diagramm, das sogenannte Arbeitsdiagramm oder ein

Entropie-Temperatur-Diagramm, das sogenannte Wärmediagramm, dienen in hohem Grade zur Veranschaulichung der Zustandsänderungen einer Substanz; doch haben sie den Nachteil, daß immer nur die Aenderung von zwei der drei, im allgemeinen unabhängigen Variabeln p, v und T zu erkennen ist. Dies hat Gibbs dazu geführt, ein dreiachsiges Koordinatensystem anzunehmen, die sogenannte thermodynamische Fläche, in welcher Entropie (η), Energie (ε) und Volumen (v) als Koordinaten auftreten und worin ein Punkt der Fläche einen bestimmten Zustand einer Substanz nach p, v und T vollständig präzisiert. Druck und Temperatur ergeben sich, wie Gibbs gezeigt hat, als Tangenten des Neigungswinkels der Fläche gegen die η-v Ebene, gemessen in zur η- und v-Achse senkrechten Ebenen. Am einfachsten führt man wieder reduzierte Größen ein und erhält dadurch ein dreiachsiges Diagramm der übereinstimmenden Zustände.

7 c) Gasverflüssigung. Die Feststellungen von Andrews über die kritische Temperatur, oberhalb welcher eine Verflüssigung selbst bei noch so hohem Druck nicht möglich ist, haben auf die Versuche zur Verflüssigung der sogenannten permanenten Gase einen großen Einfluß gehabt.

Kurz seien die vor Andrews, also ohne Kenntnis seines Diagramms, vorgenommenen Versuche erwähnt. Faraday gelang es 1823 mittels eines zugeschmolzenen gebogenen Rohres, in dem sich das Gas befand, und dessen einer Schenkel zur Druckerhöhung erhitzt wurde, während der andere Schenkel in einer Kältemischung stand, Chlor, Kohlensäure usw. flüssig zu erhalten. Nachdem 1830 Thilorier das Faradaysche Verfahren verbessert und damit Kohlensäure auch in freier Luft siedend in größeren Mengen erhalten hatte, gelang es wieder Faraday durch Verdampfen einer CO_2-Aethermischung unter vermindertem Druck Temperaturen bis ca. — 110 ° C zu erzielen. Statt durch Erwärmung vermehrte er den Druck durch eine Kompressionspumpe; dadurch gelang es ihm bis zum Jahre 1845 alle Gase bis auf 6 zu verflüssigen. Diese sechs Gase, die seinen Verflüssigungsversuchen widerstanden, nannte er permanente Gase, es waren dies Wasserstoff, Stickstoff, Sauerstoff, Methan, Kohlenoxyd und Stickoxyd. Lange blieben nun alle Versuche diesen sechs Gasen beizukommen resultatlos, obwohl z. B. Natterer bis zu Drucken von 3600 Atm. ging und durch Verwendung von Stickoxydul als Kühlmittel Temperaturen von — 115 ° erreichte, also nur wenige Grade von der kritischen Temperatur des Sauerstoffs entfernt war. Erst als Andrews zeigte, daß nicht die Höhe des Druckes, sondern die Erzielung einer genügend tiefen Temperatur das Bestimmende bei der Gasverflüssigung sei, ging man daran, weitere Temperaturerniedrigungen zu erzielen. Am gleichen Tage, dem 24. Dezember 1877, gelangte an die Pariser Akademie die Mitteilung, daß es Raoul Pictet in Genf und Louis Cailletet in Paris gelungen sei, Sauerstoff zu verflüssigen. Beide waren auf ganz verschiedene Weise vorgegangen. Pictet arbeitete nach der Methode der stufenweisen Abkühlung. Er verwendete zwei Systeme von je zwei ineinanderliegenden Röhren. In dem ersten System der sogenannten ersten Stufe verdampfte schweflige Säure unter niedrigem Druck im äußeren Rohr; hierdurch erzielte er eine so tiefe Temperatur, daß im inneren Rohr Kohlensäure unter hohem Druck flüssig wurde. Diese Kohlensäure ließ er wieder in der zweiten Stufe unter niedrigem Druck verdampfen, wodurch das im inneren Rohr dieser Stufe liegende Rohr mit Sauerstoff unter hohem Druck sehr tief abgekühlt wurde. Als er nun einen Hahn öffnete, wobei sich das Gas plötzlich entspannte, erhielt er einen Strahl flüssigen Sauerstoffs.

Cailletet arbeitete mit adiabatischer Expansion, indem er in einem mit Sauerstoff gefüllten Kapillarrohr, das in einen Preßzylinder eintauchte, durch eine Preßpumpe Drucke bis 300 Atm. herstellte und das Gas plötzlich sich entspannen ließ. Die Kapillare war durch ein Kältebad vorgekühlt. Nach der Entspannung zeigte sich das verflüssigte Gas als Nebel in der Kapillare. Geht nämlich die Entspannung so rasch vor sich, daß keine Wärme dem Gas zugeführt werden kann, so muß die ganze äußere Arbeit, welche durch das Ausströmen gegen den Atmosphärendruck geleistet wird, aus dem Wärmevorrat des Gases gedeckt werden, d. h. es muß sich sehr stark abkühlen, und zwar erfolgt die Temperatursenkung, falls wir das Boylesche Gesetz als gültig annehmen wollen, nach der Formel

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\varkappa-1}{\varkappa}}$$

Ist $\varkappa$ für Luft = 1,4, so ist z. B. beim Entspannen von 50 auf 1 Atm. von + 20 ° Anfangstemperatur an die Temperatursenkung = 203 ° C (vgl. den Artikel „Gase“).

Durch diese beiden Versuche war zwar der Beweis erbracht, daß es möglich war, die permanenten Gase bis auf Wasserstoff, der erst 1884 durch Olszewski verflüssigt wurde, zu kondensieren; aber größere Mengen konnten erst durch weitere Ausbildung der Stufenmethode erzielt werden. Hieran haben sich vor allem Olszewski in Krakau, Dewar in London und Ka-

merlingh Onnes in Leiden hervorgetan, die Aethylen oder Chlormethyl als erste, feste Kohlensäure als zweite und flüssigen Sauerstoff als dritte Stufe verwendeten. Diese Stufenmethode ist zwar in der Anlage kompliziert, aber sie arbeitet dadurch wirtschaftlich, daß die verwendeten Stoffe einen Kreislauf beschreiben und immer wieder verwendet werden. Doch läßt sich Wasserstoff, dessen kritische Temperatur bei — 242° C liegt nicht mittels dieser Methode flüssig erhalten, da die tiefste Temperatur, die man durch Verdampfen von Sauerstoff unter vermindertem Druck erhalten kann, nur — 220° C ist; dies gelang zuerst nur durch adiabatische Expansion bei vorheriger möglichst tiefer Abkühlung. Vorläufig war jedoch dieses Prinzip auch nur für geringe Mengen anwendbar, da es nicht gelang, eine Maschine bei diesen tiefen Temperaturen in Gang zu erhalten.

Durch Einführung eines bis jetzt noch nicht angewandten Prinzips gelang es, verflüssigte Gase in großer Menge herzustellen, nämlich durch Einführung der Abkühlung infolge innerer Arbeit. Da dies Verfahren nicht nur für die technische Verwendung der tiefen Temperaturen, sondern auch für die wissenschaftliche Forschung von einschneidender Bedeutung wurde, so sei dieser Vorgang etwas ausführlicher erörtert, und sein Unterschied gegen die vorher verwendeten Verfahren hervorgehoben.

Sowohl bei der Stufenmethode als auch bei der adiabatischen Expansion haben wir ein abgeschlossenes Gasquantum das sich ausdehnt, dabei einen Kolben oder den Gegendruck fortschiebt und infolge dieser Leistung einer äußeren Arbeit, da keine Wärme zugeführt wird, sich abkühlt. Dabei ist es augenscheinlich gleichgültig, ob die Expansion gegen den äußeren Atmosphärendruck, oder bei der Stufenmethode, wo durch die Pumpen ein niedriger Druck hergestellt wird, gegen diesen niedrigeren Druck erfolgt. Die Hauptsache ist, daß wir ein abgeschlossenes Gasquantum haben, welches sich gegen einen Druck ausdehnen kann, und auf welches von außen keine Kraft ausgeübt wird. Nehmen wir z. B. ein Gas, das in einen Zylinder eingeschlossen ist, der auf der einen Seite einen beweglichen Kolben, auf der anderen Seite eine feste Wand besitzt, die nur eine kleine, jedoch verschließbare Oeffnung hat; denken wir die Wand des Zylinders aus völlig wärmeundurchlässigem Material und öffnen die Oeffnung in der Wand, ohne den Kolben zu bewegen; das Gas wird durch die Oeffnung ausströmen, den Luftdruck wegschieben, äußere Arbeit leisten, sich stark abkühlen. Wiederholen wir nun den Vorgang, setzen aber in dem Augenblick, in dem wir die kleine Oeffnung aufmachen, den Kolben in Bewegung und zwar so rasch, daß der Druck in dem Zylinder während des ganzen Ausströmens weder steigt noch fällt. Augenscheinlich wird auch hier der äußere Luftdruck fortgeschoben, aber nicht durch das Gas sondern, mittelbar durch das Gas hindurch, durch die Kraft, die den Kolben bewegt. Das Gas leistet also keine äußere Arbeit, es wird sich nicht abkühlen, solange das Boylesche Gesetz gilt.

Es sei mit u_1 und u_2 die innere, mit $p_1 v_1$ und $p_2 v_2$ die äußere Arbeit vor und hinter dem Zylinder dargestellt. So haben wir die Gleichung

$$u_1 + p_1 v_1 = u_2 + p_2 v_2$$

Ist $p_1 v_1 = p_2 v_2$

so folgt $u_1 = u_2$

d. h. es kann keine Temperaturänderung eingetreten sein.

Wie nun oben gezeigt wurde, ist jedoch pv nicht konstant, sondern von p und v abhängig, so daß also $p_1 v_1 \gtrless p_2 v_2$ ist und daher $u_1 \gtrless u_2$ wird. Es tritt also eine Erwärmung oder Abkühlung ein.

Dies hatten nun W. Thomson und Joule schon im Jahre 1845 festgestellt und näher erforscht mittels ihrer berühmten „Wattepfropfenexperimente". Sie ließen durch ein Buchsbaumrohr, in dem sich zwischen zwei durchlöcherten Scheiben der Wattepfropfen befand, Luft ohne äußere Arbeit entspannen und maßen mittels fein geteilter Quecksilberthermometer die Temperatur vor und hinter dem Pfropfen. Sie fanden dabei, daß bei Luft und anderen Gasen Abkühlung, bei Wasserstoff Erwärmung eintrat. Die Abkühlung der Luft war um so größer, mit je tieferer Temperatur die Luft in den Durchströmapparat eintrat. Sie stellten die empirische Formel auf

$$dT = 0{,}267 . \left(\frac{273}{T}\right)^2 . dp$$

d. h. der Kühleffekt pro 1 Atm. Druckdifferenz ist umgekehrt proportional dem Quadrat der Temperatur.

Die Versuche von Thomson und Joule wurden von anderen später wiederholt, und es wurde auch die Abhängigkeit des Kühleffekts d. h. die Temperatursenkung pro 1 Atm. Druckabfall vom Druck erforscht. Wie durch die Versuche von Dalton, Bradley und Hale, und Vogel festgestellt wurde, ist der Kühleffekt abhängig vom Druck und zwar nimmt derselbe mit wachsendem Druck ab. Da Vogel im Gegensatz zu den anderen Experimentatoren, die von verschiedenen Anfangsdrucken auf 1 Atm. ausströmen ließen, immer mit konstantem Druckabfall von 6 Atmosphären arbeitete, war es ihm möglich, aus seinen Versuchen die Abhängigkeit des Kühleffektes vom Druck abzuleiten, und zwar fand er,

daß der Kühleffekt linear mit dem Druck abnimmt. Die oben behandelten Erscheinungen der Abkühlung durch innere Arbeit wurden nun erst von C. v. Linde und kurz darauf von Hampson zur Herstellung tiefer Temperaturen und zur Verflüssigung der Gase benützt.

Die Lindesche Maschine hat folgenden Arbeitsvorgang. In einem zweistufigen Kompressor wird die Luft z. B. auf 16 bezw. 200 Atm. isotherm komprimiert. Die hochgespannte Luft durchströmt zuerst eine Rohrschlange, die in einer Kältemischung liegt, und tritt sodann in die innerste von 3 ineinanderliegenden Kupferspiralen ein, die den eigentlichen Verflüssigungsapparat bilden. Dieser Apparat arbeitet nach dem Regenerativverfahren, d. h. die schon abgekühlte Luft läuft im Gegenstrom an der ankommenden vorbei und entzieht dieser dadurch Wärme. Die in das innerste Rohr eintretende Luft wird durch ein erstes Regulierventil ohne Leistung äußerer Arbeit auf 16 Atmosphären entspannt; sie kühlt sich ab und strömt durch das mittlere Rohr zur Hochdruckseite des Kompressors zurück, wo sie wieder auf 200 Atmosphären verdichtet wird und, wie oben geschildert, wieder in den Apparat eintritt. Dabei gibt sie ihre Kälte an die durch das innerste Rohr zuströmende Luft ab, so daß diese Luft bedeutend kälter vor das Regulierventil tritt, wo sie sich durch die Entspannung weiter abkühlt. So summieren sich die durch die Entspannung auftretenden kleinen Abkühlungen, bis nach einiger Zeit die Abkühlung der Luft hinter dem ersten Ventil soweit fortgeschritten ist, daß durch weitere Entspannung von 16 auf 1 Atmosphäre Verflüssigung eintreten kann. Diese Entspannung geschieht durch das zweite Ventil, das so eingestellt wird, daß ca. 20 % der aus dem ersten Ventil austretenden Luft sich hier weiter entspannen, während die übrigen 80 % durch das mittlere Rohr des Gegenstromapparates zum Kompressor zurückfließen. Von diesen durch das zweite Ventil ausströmenden 20 % der vom Kompressor verdichteten Luftmenge wird ca. ¼, also 5 % der ganzen Menge, verflüssigt und tritt in ein Dewarsches Gefäß, d. i. ein doppelwandiges, evakuiertes und zur Abhaltung der Strahlung versilbertes Glasgefäß, ein; der nicht verflüssigte Rest strömt durch das äußere Rohr des Apparates in die Atmosphäre, nachdem er vorher noch zur Verbesserung der Kühlwirkung im mittleren Rohr gedient hat. Die Einführung des Gegenstromverfahrens zur Summierung der Abkühlung sowie die zweistufige Kompression, die gestattet, daß der größte Teil der Luft nicht von 1 Atmosphäre auf 200 Atmosphären, sondern von 16 auf 200 komprimiert werden muß, verbürgen der Linde-Maschine eine relativ hohe Wirtschaftlichkeit. Die Arbeitsleistung ist nämlich dem Quotient aus End- und Anfangsdruck, dagegen der Kühleffekt der Differenz derselben proportional. Doch eignet sich die Linde-Maschine für kleinere Versuche im Laboratorium weniger gut, da es ziemlich lange dauert, bis die Verflüssigung eintritt; hierin besteht nun der Vorteil des von Hampson konstruierten Apparates, der etwas einfacher ist und schon nach ca. 10 Minuten flüssige Luft liefert.

Hampson expandiert nur einstufig von 200 auf 1 Atmosphäre und läßt die abgekühlte Luft nach Abgabe ihrer Kälte nicht zum Kompressor zurück, sondern in die Atmosphäre austreten. Die Entspannung erfolgt durch eine Reihe von drei oder mehr beim Ein- und Austritt miteinander verbundenen, engen, in vielen konzentrischen Spiralen aufgewundenen Kupferröhrchen; die Expansion erfolgt ebenfalls durch ein Ventil und die entspannte Luft strömt durch die Zwischenräume der eng zusammenliegenden Kupferrohre hindurch und gibt ihre Kälte an die vom Kompressor kommende Luft ab.

Sämtliche Kupferröhrchen liegen in einem gut gegen Wärme isolierten Kasten, bei manchen Apparaten in einem Dewarschen Gefäß. Die gewonnene flüssige Luft wird in einem Dewarschen Gefäß aufgefangen.

Es sei kurz eine erst im letzten Jahrzehnt ausgebildete Luftverflüssigungsmaschine erwähnt, die nicht nur mit innerer Arbeit arbeitet, sondern die Luft in einem Zylinder unter Abgabe äußerer Arbeit expandieren läßt, nämlich die Maschine von Claude.

Der Arbeitsvorgang ist folgender: Luft von — 100° C und 40 Atmosphären Druck entspannt sich, äußere Arbeit leistend, in einem Expansionszylinder und kühlt sich dabei unter — 140° C ab. Diese Luft strömt im Gegenstrom an Röhren vorbei, die Luft von — 100° und 40 Atmosphären Druck enthalten und kühlt dieselbe auf etwa — 140° ab. Bei dieser Temperatur ist bei 40 Atmosphären der Gaszustand nicht mehr möglich, und es tritt Verflüssigung ein. Die vom Zylinder kommende Luft, die sich im ersten Gegenstromapparat auf etwa — 130° erwärmt hat, wird nun dazu verwendet, die auf 40 Atmosphären verdichtete, zum Expansionszylinder strömende Luft auf — 100° vorzukühlen. Da entgegengesetzt wie bei der inneren Arbeit bei der Abkühlung durch äußere Arbeit der Kühleffekt mit sinkender Temperatur abnimmt, ist eine Verflüssigung im Expansionszylinder selbst unwirtschaftlich.

Nachdem durch die Möglichkeit der maschinellen Herstellung flüssige Luft in großen Mengen zur Verfügung stand, gelang es die beiden noch der Verflüssigung widerstehenden Gase Wasserstoff und Helium in größeren Mengen zu kondensieren.

Wie schon oben erwähnt, wurde ersteres Gas zwar von Olszewski durch Entspannung als Nebel erhalten und es gelang Dewar sogar durch Entspannung von stark vorgekühltem Wasserstoff etwa 250 ccm zu verflüssigen. In bequemer und relativ einfacher Weise ließ sich aber dieses Gas flüssig erst herstellen als sein Verhalten bezüglich des Thomson-Joule-Effekts näher erforscht war.

Thomson und Joule stellten fest, daß Wasserstoff sich bei gewöhnlicher Temperatur bei Drosselung erwärmt, während alle anderen Gase sich abkühlen. Dies entspricht auch der Abweichung, die Wasserstoff vom Boyleschen Gesetz zeigt; denn während bei allen anderen Gasen pv mit wachsendem Druck abnimmt, nimmt dieses

Produkt bei Wasserstoff zu. Betrachten wir nun wieder das pv — p-Diagramm (Fig. 2) z. B. für Luft, so sehen wir, daß pv zuerst mit wachsendem Druck sinkt, durch ein Minimum hindurchgeht und dann wieder ansteigt. Da die innere Arbeit aber bei adiabatischem Verlauf der Drosselung nur von pv abhängt, so muß zuerst Abkühlung, beim Minimum Nullwirkung, später Erwärmung eintreten. Dies stimmt auch, qualitativ wenigstens, mit den Resultaten der vorgenannten Forscher überein, die bei Luft eine Verringerung des Kühleffekts mit steigendem Druck fanden. Da nun Wasserstoff auch dem Gesetz der übereinstimmenden Zustände folgt, so müssen für dieses Gas gleiche Erscheinungen auftreten, d. h. bei sinkendem Druck muß die Wärmewirkung kleiner, dann Null werden und schließlich in Kühlwirkung übergehen.

Ferner ist aus den Feststellungen Thomsons und Joules zu entnehmen, daß es möglich sein muß, die „Inversion", d. h. jene Stelle, an der weder Wärme- noch Kühlwirkung beim Drosseln auftritt, zu erreichen, wenn man die Ausgangstemperatur ändert. Da ihre Formel sagt: je tiefer die Temperatur, desto größer die Abkühlung, so muß man durch Erniedrigen der Ausgangstemperatur der Drosselung von Wärmewirkung zu Kühlwirkung übergehen können. Von dieser Ueberlegung Gebrauch machend, fand Olszewski, daß bei Wasserstoff bei einer Temperatur von — 80,5° weder Abkühlung noch Erwärmung auftritt.

Nachdem festgestellt ist, daß die Größe des Kühleffekts vom Druck und von der Temperatur abhängt, kann man weder von einem Inversionspunkt, noch von einer Inversionstemperatur an sich sprechen, sondern nur noch von einer Inversionstemperatur bei einem bestimmten Druck. Wir haben es also mit einer Inversionskurve zu tun. Rose-Innes und Love haben diese Linie als eine im pt-Diagramm zur p-Achse parallele Gerade dargestellt, die das Gebiet der Kühlwirkung und Wärmewirkung scheidet. Dies ist jedoch nur eine erste Annäherung, wie Vogel nachgewiesen hat, der zeigte, daß bei Heranziehen von Gliedern höherer Ordnung der van der Waalsschen Gleichung diese Gerade in eine Parabel übergeht.

Eine größere Uebereinstimmung mit den Versuchswerten zeigt dagegen jene Inversionskurve, die Porter angegeben hat, der zuerst den Begriff der Inversionskurve oder wie er sie nannte „Nullkurve" aufstellte. Diese Kurve, die von der reduzierten van der Waalsschen Zustandsgleichung ausgeht, ist von Vogel und Fliegner behandelt worden, doch ist ihre Uebereinstimmung mit den experimentell gefundenen Werten noch nicht für ihren ganzen Verlauf festgestellt.

Fliegner leitet für sie folgende einfache Beziehungen zwischen dem reduzierten Druck und der reduzierten Temperatur ab

$$\pi = 12 \cdot \sqrt{12\,\tau} - 12\,\tau - 27$$

Diese Kurve ist in Figur 3 wiedergegeben; an ihr lassen sich die oben besprochenen

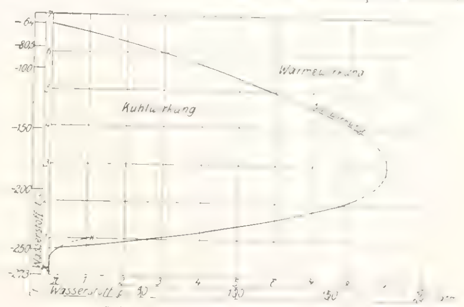


Fig. 3. Inversionskurve.

Abhängigkeiten des Thomson-Joule-Effekts von Druck und Temperatur sehr gut erkennen. Sie sagt aus, daß bei einer unendlich kleinen Drucksenkung innerhalb des von der Kurve umschlossenen Gebietes Abkühlung, außerhalb Erwärmung eintritt, während auf der Kurve selbst die sogenannte Nullwirkung herrscht. Nehmen wir z. B. Wasserstoff mit dem kritischen Druck 20 Atm. und der kritischen Temperatur — 242° C an, so zeigt uns dies Diagramm, da ja

$$\pi = \frac{p}{p_k} \text{ und } \tau = \frac{T}{T_k}$$

ist, daß bei einer Temperatur die höher liegt als — 64° C keine Abkühlung stattfinden kann, während z. B. bei — 70° bei genügend kleinen Anfangsdrucken eine Kühlwirkung möglich erscheint. Nehmen wir ferner an, daß auch bei Wasserstoff der Thomson-Joule-Effekt linear mit dem Druck abnimmt, so ist aus dem Diagramm zu entnehmen, daß bei Entspannung von ca. 100 Atm. auf 1 Atm. bei — 80,5 die Nullwirkung eintritt, die Olszewski gefunden hat. Denn es liegt bei diesen Verhältnissen ein gleichgroßes Stück der Entspannung im Erwärmungs- und im Abkühlungsgebiet, diese beiden Wirkungen ergeben also zusammen die Nullwirkung. Zu der Porterschen Kurve sei noch erwähnt, daß wie Fliegner gezeigt hat, die Inversionskurve nur bis zum Schnittpunkt mit der Sättigungslinie Geltung hat und von da ab dieser folgen muß, da die Gültigkeit der van der Waalsschen Gleichung im Sättigungsgebiet aufhört.

Nach diesen Erörterungen, die jedoch notwendig erschienen, da über den Begriff des sogenannten Inversionspunktes noch

große Unklarheit herrscht, sei in der Beschreibung der Versuche zur Wasserstoffverflüssigung fortgefahren.

Nachdem durch die Feststellung von Olszewski bekannt war, daß dieses Gas unter — 80,5 ° einen Kühleffekt zeigt, gelang es Travers zuerst, dieses Gas in beliebiger Menge zu verflüssigen, indem er es durch einen zu diesem Zweck umgestalteten und verbesserten Hampson-Apparat, der mit flüssiger Luft gekühlt wurde, unter Leistung innerer Arbeit ausströmen ließ. Dieser Apparat, sowie ein ähnlicher von Olszewski, der kurz nach Travers ebenfalls den Wasserstoff in großen Mengen verflüssigt hat, sind in dem Buch von Travers (vgl. „Literatur") ausführlich beschrieben. Beide Forscher arbeiteten bei Temperaturen von etwa — 190 ° und Drucken von 150—200 Atm.; wir entnehmen dem Porterschen Diagramm, daß sich die Entspannung fast völlig im Gebiet der Kühlwirkung vollzog, also ein hoher Effekt erzielt wurde.

Nun blieb noch ein Gas übrig, das Helium. Zuerst als Bestandteil des Sonnenspektrums festgestellt, wurde es 1895 auch auf der Erde gefunden und zwar in der atmosphärischen Luft. Nachdem es Kamerlingh Onnes, dem verdienten Vorstand des Kryogenen Laboratoriums der Universität Leiden, unter unendlichem Aufwand von Energie und Erfindungsgabe gelungen war, festzustellen, daß auch bei Helium, das sich in dieser Hinsicht ähnlich wie Wasserstoff verhält, die Wärmewirkung in Kühlwirkung übergeht, bei Temperaturen, die unterhalb — 252 ° liegen, gelang es diesem Forscher am 10. Juli 1908 dieses Gas zu verflüssigen, indem er es durch festen Wasserstoff auf — 258 ° vorkühlte und im Gegenstromapparat entspannen ließ.

Es sei hier erwähnt, daß es bis heute noch nicht gelungen ist, Helium in den festen Zustand überzuführen, obwohl Kamerlingh Onnes den Druck, unter dem er flüssiges Helium verdampfen ließ, auf $^1/_5$ mm Quecksilber erniedrigte. Hierbei wurde eine Temperatur erreicht, die nur 2 ° über dem absoluten Nullpunkt liegt. Es ist dies die tiefste bisher erzeugte Temperatur.

Tabelle der kritischen Daten

	Kritische Temperatur ° C	Kritischer Druck Atm.
Methan	— 81,8	54,9
Stickoxyd	— 93,5	71,2
Sauerstoff	— 118,8	50,8
Luft	— 140,0	39,0
Kohlenoxyd	— 141,0	36,0
Stickstoff	— 146,0	35,0
Wasserstoff	— 242,0	20,0
Helium	— 268,0	2,3

Literatur. ***Cagniard de la Tour***, *Ann. Chim. Phys. (2)* ***21***, *127, 178, 1822;* ***22***, *140, 1823.* — ***Th. Andrews***, *Phil. Trans. R. S. L.* ***159***, *575, 1869 und Ostwalds Klassiker Nr. 132, Leipzig 1902.* — ***M. v. Smoluchowski***, *Pogg. Ann. IV,* ***25***, *205, 1908.* — ***James Thomson***, *Proc. R. S. L.* ***20***, *1, 1871.* — ***J. D. van der Waals***, *Dissert., Leiden 1873.* — ***Derselbe***, *Die Kontinuität des gasförmigen und flüssigen Zustandes, I, Leipzig 1899.* — ***E. H. Amagat***, *Compt. rend.,* ***123***, *30, 83, 1896.* — ***J. W. Gibbs***, *Thermodynamische Studien. Uebersetzt v. W. Ostwald, Leipzig 1892.* — ***J. Faraday***, *Phil. Trans. R. S. L.,* ***113***, *160, 1823;* ***135***, *155, 1845.* — ***R. Pictet***, *C. R.,* ***85***, *1270, 1879.* — ***L. Cailletet***, *C. R.,* ***85***, *1210, 1879.* — ***Thomson-Joule***, *Phil. Trans. R. S. L.,* ***143***, *357, 1854;* ***144***, *321, 1854;* ***152***, *579, 1862.* — ***C. Linde***, *Wied. Ann.,* ***57***, *329, 1896.* — ***E. Vogel***, *Ueber die Temperaturveränderung von Luft und Sauerstoff beim Strömen durch eine Drosselstelle, Dissert., München 1910.* — ***A. Fliegner***, *Die Kurven konstanter Erzeugungswärme, Vierteljahrsch. Naturf. Ges. Zürich, 55, 1910.* — ***A. W. Porter***, *Phil. Mag. (6)* ***11***, *554, 1906.* — ***K. Olszewski***, *Drudes Ann.* ***7***, *818, 1902.* — ***Kamerlingh Onnes***, *Comm. from the Phys. Lab. Leiden Nr. 108.* — ***Travers***, *Experimentelle Untersuchung von Gasen. Uebersetzt von Estreicher, Braunschweig 1905.* — ***Kuenen***, *Die Zustandsgleichung der Gase, Braunschweig 1907.* — ***Derselbe***, *Theorie der Verdampfung und Verflüssigung von Gemischen, Leipzig 1906.* — ***G. Claude***, *Air liquide Oxygène Azote, Paris 1909.*

F. Noell.

Agricola

Georg.

Geboren am 24. März 1490 zu Glauchau i. Sa., gestorben am 21. November 1555 zu Chemnitz. Agricola, der eigentlich Bauer hieß, wurde mit 20 Jahren Rector extraordinarius der griechischen Sprache an der sogenannten Großen Schule in Zwickau, studierte 2 Jahre später in Leipzig Philologie, Medizin mit Physik und Chemie. Darauf reiste er nach Italien und erlangte dort nach zweijährigem Aufenthalt den medizinischen Doktorgrad. Nach der Rückkehr (1527) ließ er sich als Arzt in Joachimstal nieder, wo die günstige Gelegenheit zum Studium der Erzgewinnung und -verarbeitung ihn bald zu Veröffentlichungen auf diesem Gebiete anregte. 1530 vom Kurfürsten Moritz zum Historiographen ernannt, siedelte er nach Chemnitz über. Dort wurde er bald zum Stadtphysikus und 1546 zum Bürgermeister gewählt. Mißhelligkeiten, die sich aus seinem zähen Festhalten am katholischen Glauben ergaben, führten 1552 zu seiner Absetzung und waren auch die Ursache, daß sein Begräbnis in Chemnitz verweigert wurde, so daß er erst 5 Tage nach seinem Tode in Zeitz beigesetzt wurde.

Seine wesentlichsten Schriften, durch die er der erste systematische Mineralog Deutschlands, der „Vater der Mineralogie" wurde, sind: 1528 Bermannus sive de re metallica dialogus (liber I); 1544 De ortu et causis subterraneorum (libri V); 1545 De natura eorum, quae effluunt e terra (libri IV); 1546 De natura fossilium (libri

X); 1546 De veteribus et novis metallis (libri II); 1548 De animantibus subterraneis (liber I); sein Hauptwerk, 1550 vollendet, erschien 1556 unter dem Titel De re metallica (libri XII). Eine lateinische Gesamtausgabe seiner Werke erschien 1550 und 1558 in Basel. Seine mineralogischen Schriften sind übersetzt von E. J. T. Lehmann (4 Bde Freiberg 1806 bis 1813).

Literatur. *A. D.* ***Richter****, Vita Georgii Agricolae, Annaberg 1755. —* ***Fr. Aug. Schmid****, Georg Agricolas Bermannus mit einer Einleitung, Freiberg 1806. —* ***F. L. Becher****, Die Mineralogen G. Agricola im 16. und Werner im 18. Jahrhundert, Freiberg 1819. —* ***G. H. Jakobi****, Der Mineralog Georgius Agricola und sein Verhältnis zur Wissenschaft seiner Zeit, Werdau 1889. —* ***Hofmann****, Dr. Georgius Agricola aus Glauchau, Glauchau 1898.*

K. Spangenberg.

Airy

Sir George Biddell.

Geboren am 27. Juli 1801 zu Alnwick in Northumberland; gestorben am 4. Januar 1892 in London. Er studierte Mathematik und Physik in Cambridge, wurde 1828 Professor und Direktor der Sternwarte daselbst. 1836 königlicher Astronom und Direktor der Sternwarte in Greenwich, war 1871 bis 1873 Präsident der Royal Society in London, wurde 1872 in den Adelsstand erhoben, 1873 legte er das Direktorium der Greenwicher Sternwarte nieder. Zur Beobachtung totaler Sonnenfinsternisse ging Airy 1842 nach Turin, 1851 nach Gotenburg, 1860 nach Pobes in Spanien. 1839 erfand er den Kompensationskompaß. Zahlreiche Arbeiten auf dem Gebiete der Optik; 1846 erster Versuch einer Theorie der magnetischen Drehung der Polarisationsebene des Lichts.

Literatur. *Autobiographie. Herausgegeben von seinem Sohn* ***Wilfrid Airy*** 1896.

E. Drude.

Akridingruppe.

1. Definition. 2. Konstitution und Bezeichnungsweise. 3. Vorkommen und synthetische Methoden. 4. Charakteristische physikalische und chemische Gruppeneigenschaften. 5. Spezielle Beschreibung wichtiger Verbindungen.

1. Definition. Unter der Bezeichnung Akridingruppe wird eine Anzahl fast ausschließlich synthetisch gewonnener Substanzen zusammengefaßt, die zur Klasse der stickstoffhaltigen, aromatischen, heterozyklischen Verbindungen gehören. Die Gruppe hat den Namen von ihrem einfachsten Vertreter übernommen, dem zuerst im Steinkohlenteer aufgefundenen Akridin, das seinerseits von den Entdeckern so bezeichnet wurde, weil es die Eigenschaft besitzt, auf Epidermis und Schleimhäute stark reizend zu wirken (Annalen der Chemie und Pharmazie **158.** 265).

2. Konstitution und Bezeichnungsweise. Bezüglich der chemischen Konstitution des Akridins hat sich ergeben, daß es als ein Abkömmling des Pyridins aufgefaßt werden kann, insofern als es dessen sechsgliedrigen, stickstoffhaltigen Ring symmetrisch zwischen zwei Benzolkerne eingelagert enthält. Das Akridin stellt also das strukturelle Analogon zum Anthracen dar und ist durch nachstehende Konstitutionsformel charakterisiert

H H
C C CH
HC C C CH
HC C C CH
C N C
H H

die von manchen Forschern auch in der folgenden „orthochinoiden" Form geschrieben wird

H H H
C C C
HC C C CH
HC C C CH
C N C
H H

Bewiesen wurde diese Konstitution durch zahlreiche Synthesen des Akridins, vor allem aber durch seinen sukzessiven Abbau zu Chinolin α, β dicarbonsäure und Pyridin $\alpha, \alpha', \beta, \beta'$ tetracarbonsäure, sowie auch durch die Ueberführung in α, β Dimethylchinolin bei der Reduktion nach Sabatier mit feinverteiltem Nickel und Wasserstoff (Atti R. Accad. dei Lincei (5) 16 I. 922). Das Akridin kann demnach auch als α, β Benzochinolin betrachtet werden und ist isomer mit den Naphtochinolinen und dem ein β, γ Benzochinolin darstellenden Phenanthridin. Werden nacheinander beide Benzolkerne durch Naphtalinreste ersetzt, so entstehen Phenonaphtakridine und Naphtakridine. Auch der Anthrachinonkomplex kann die Rolle der Benzolringe übernehmen, desgleichen der Rest des Phenanthrens.

So hat man z. B., von diesem Kohlenwasserstoff ausgehend, ein Phenanthrakridin folgender Konstitution aufbauen können:

H
C
N

Schließlich sind noch Verbindungen gewonnen worden, bei denen ein Benzolkern des Aridinds durch den Rest eines zweiten Moleküls Akridin ersetzt worden ist. Derartige Substanzen werden Chinakridine genannt.

Die Abkömmlinge des Akridins zerfallen in zwei Gruppen, je nachdem die Benzolkerne substituiert sind oder das einzige, im Pyridinring verfügbare Wasserstoffatom ersetzt ist. Die auf die letztgenannte Weise entstehenden Verbindungen, die sich von den anderen meist durch besondere Reaktionen unterscheiden, werden als Mesoderivate bezeichnet. Zur Feststellung des genauen Ortes der einzelnen Substituenten verwendet man jetzt allgemein folgendes Schema

H H H
C_8 C_9 C_1
H_7C C C C_2H
H_6C C C C_3H
C_5 N C_4
H H

Von Akridin leiten sich zwei weitere Typen ab, auf welche die betreffenden Derivate der Einfachheit halber bei der systematischen Bezeichnung stets bezogen werden. Es sind dies die Dihydroakridine, auch **Akridane** genannt, und die Akridone. Bei beiden Verbindungsklassen ist die Parabindung des Akridins aufgespalten. Während sie bei den ersteren durch Wasserstoff abgesättigt ist, enthalten die Akridone als wesentlichen Bestandteil eine Ketogruppe

H_2 C … N … R — Dihydroakridine = Akridane

O ‖ C … N … R — Akridone

3. Vorkommen und synthetische Methoden. Akridinderivate hat man bis jetzt weder im Pflanzen- noch im Tierreich aufgefunden. Das Akridin selbst ist zuerst von Graebe und Caro in geringer Menge im Steinkohlenteer entdeckt worden, in welchen es offenbar durch eine pyrogene Reaktion gekommen ist. Es findet sich in der Anthracenfraktion und ist begleitet von Spuren seiner Dihydroverbindung (Ber. **42** 1178). Alle übrigen Akridinderivate sind nur durch künstlichen Aufbau zu gewinnen. Im nachstehenden sollen die wichtigsten der zahlreichen uns hierfür zur Verfügung stehenden synthetischen Methoden aufgeführt werden.

1. Akridine entstehen durch Einwirkung von Karbonsäuren auf Diphenylamin und dessen Derivate bei Gegenwart von Chlorzink. Hierbei bilden sich primär N-Acidylverbindungen, aus denen sich H_2O abspaltet (Bernthsen Ann. **224** 1).

O R C H H … N → R C … N

Mit höheren Fettsäuren oder aromatischen Säuren entstehen demnach Mesoderivate. An Stelle der Säuren können die entsprechenden Trihalogenverbindungen (Ber. **17** 1), z. B. Chloroform oder Benzotrichlorid, verwendet werden.

2. Eine andere, sehr allgemeine, in der speziellen Ausführung nach verschiedenen Richtungen hin modifizierte Synthese, bei welcher primär Dihydroakridinderivate entstehen, beruht auf der inneren Kondensation gewisser o-Aminoderivate von Di- und Triarylmethanverbindungen. So liefert z. B. o-Aminodiphenylmethan beim Erhitzen mit Bleioxyd Akridin (Ber. **26** 3086)

$$C_6H_4\left<\begin{matrix}CH_2-\\NH_2H\end{matrix}\right>C_6H_4 + O_2$$

$$= C_6H_4\left<\begin{matrix}\overset{H}{C}\\N\end{matrix}\right>C_6H_4 + 2H_2O$$

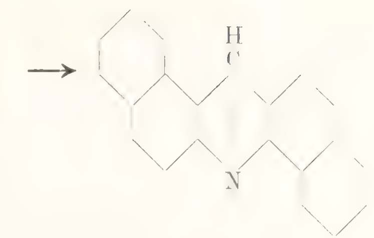
Diese Aminodi- und -triphenylmethanverbindungen brauchen nicht immer gesondert hergestellt zu werden, sondern lassen sich gleich in statu nascendi in Akridine überführen, wenn man die zweite Komponente so wählt, daß sich eine Kondensations-Reaktion abspielen kann. Man kann dies auf mehrfache Weise erreichen:

a) Aldehyde werden mit 'Meta-Diaminen zur Umsetzung gebracht (DRP. 52324 59179). Hierbei bilden sich Di- bezw. Triarylmethanverbindungen mit freien Amidogruppen, zwischen welchen Abspaltung von Ammoniak erfolgt. Die so entstehenden Dihydroakridine oxydieren sich dann meistens von selbst an der Luft zu Akridinen:

2 Mol. Dimethylphenylendiamin
+ 1 Mol. Formaldehyd

Eine Abänderung dieser Synthese, bei welcher durch Wasserabspaltung der Ringschluß herbeigeführt wird, und die besonders zur Gewinnung von Phenonaphtakridinen geeignet ist, geht von einem Gemenge von β-Naphtol mit m-Aminophenolen aus, das mit Aldehyden umgesetzt wird (Ber. 38 3787)

b) Naphtakridine können besonders leicht durch Einwirkung von Trioxymethylen (Ber. 36 1027) oder von Methylenjodid oder -chlorid auf α- und β-Naphthylamine erzeugt werden (Journ. Chem. Soc. 89 1387). Beim Erhitzen dieser Komponenten entstehen Dinaphtylmethanderivate, die zunächst innere Kondensation und später Oxydation erleiden, z. B.



1, 2, 2′, 1′ Dinaphtakridin.

c) o-Aminobenzylalkohol setzt sich mit Aminen und Phenolen der Naphthalinreihe glatt zu Phenonaphtakridinen um (Ullmann Ber. 35 2670)

Von Baezner (Ber. 37 3077) ist gezeigt worden, daß man hierbei mit Vorteil naszierenden o-Aminobenzylalkohol verwendet. Die Ausführung der Synthese gestaltet sich dann so, daß man o-Nitrobenzylchlorid mit Naphtolen oder Naphtylaminen bei Gegenwart von Zinnchlorür erhitzt.

3. Phenonaphtakridine werden auch aus o-Tolylnaphtylaminen durch Erhitzen mit Schwefel gewonnen (Ber. 37 2923)

$$HN\begin{cases} C_6H_4 - CH_3 \\ C_{10}H_6 - H \end{cases} \rightarrow N\begin{cases} C_6H_4 \\ C_{10}H_6 \end{cases}CH$$

4. Eine neuerdings von Borsche aufgefundene Synthese liefert zunächst Tetrahydroakridinderivate, bei denen der Wasserstoff an einen Benzolkern angelagert ist (Ber. 41 2203).

Solche Verbindungen entstehen leicht auf zweierlei Weise, nämlich

a) durch Kondensation aromatischer ortho-Aminoaldehyde und -ketone mit R-Hexamethylenketonen, z.B.

H$_2$ R
C C
→ H$_2$C C
H$_2$C C
C N
H$_2$

oder b) durch sinngemäße Anwendung der Pfitzingerschen Cinchoninsäure-Synthese, d. h. man erhitzt Cyklohexanonderivate mit Isatinsauren Alkalien und spaltet aus den gebildeten Tetrahydroakridincarbonsäuren Kohlendioxyd ab

CO.OK
CH$_2$ O = C
H$_2$C C H$_2$
H$_2$C C = O
C H$_2$ N
H$_2$

H$_2$ H
C C
→ H$_2$C C
H$_2$C C
C N
H$_2$

Die Tetrahydroverbindungen lassen sich durch Destillation mit Bleioxyd leicht in die Akridine selbst überführen.

5. Akridone bilden sich glatt a) durch innere Wasserabspaltung mittels konzentrierter Schwefelsäure aus Arylanthranilsäuren (Ann. Chem. Pharm. 276 45), die ihrerseits durch das Verfahren von Ullmann — Einwirkung von Halogenbenzolen auf Anthranilsäure bei Gegenwart von fein verteiltem metallischen Kupfer oder Kupferjodür — leicht zugänglich geworden sind

O
‖
C OH
H
N
H
Phenylanthranilsäure

O
‖
C
→
N
H
Akridon

b) durch Ammoniak-Austritt aus o-Diaminobenzophenonen (Ber. 27 3362):

c) durch Kondensation von Anthranilsäure mit R-Hexamethylenketonen und Oxydation der hierbei primär entstehenden Tetrahydroakridone (Ber. 42 621);

d) aus ortho-Nitrodiphenylmethanen durch einfaches Erhitzen, wo bei sich zunächst Phenylanthroxane bilden, die nachher Umlagerung erleiden (Ber. 42 591)

CH$_2$
NO$_2$
o-Nitrodiphenylmethan

C
→ O
N
Phenylanthroxan

O
‖
C
→
N
H
Akridon

4. Charakteristische physikalische und chemische Gruppeneigenschaften. Bezüglich der allgemeinen physikalischen und chemischen Eigenschaften der Akridine ist zu sagen, daß sie durchweg außerordentlich beständige Verbindungen darstellen, denn sie werden weder durch Erhitzen mit Mineralsäuren, noch durch Schmelzen mit Kali, noch durch Destillation über Zinkstaub verändert. Sie sind verhältnismäßig schwache Basen, da sie hinter Pyridin und Chinolin rangieren. Der Akridinkomplex besitzt chromophore Eigenschaften, denn Farbe tritt schon bei der Salzbildung deutlich hervor (Halochromie). Sie wird durch auxochrome Gruppen sehr gesteigert. Noch ausgeprägter ist das bisweilen sogar enorm starke Fluoreszenzvermögen, das beinahe allen Akridinderivaten eigentümlich ist.

Beide Erscheinungen stehen im Zusammenhang mit dem Vorhandensein freier Affinitätsbeträge am N und CH des Pyridinrings. Dementsprechend bilden die Akridine auch ziemlich beständige Salze und Additionsprodukte mit Halogenen. Besonders charakteristisch ist ferner in diesem Sinne die Anlagerung von Halo-

genalkylen, wobei die sogenannten Akridiniumsalze entstehen.

Man hat diese Substanzen bisher meist analog den entsprechenden Pyridinium- und Chinoliniumverbindungen als Abkömmlinge des fünfwertigen Stickstoffs aufgefaßt. Neuerdings bricht sich jedoch immer mehr die Ueberzeugung Bahn, daß die Wernerschen Anschauungen über Ammoniumsalze (vgl. A. Werner Neuere Anschauungen auf dem Gebiete der Anorgan. Chemie I. Aufl. S. 115 fg.) auch auf solche zyklischen Verbindungen ausgedehnt werden müssen. Hiernach sind z. B. Akridinhydrochlorid und Akridinjodmethylat folgendermaßen zu formulieren

HCl $\qquad$ CH_3-J

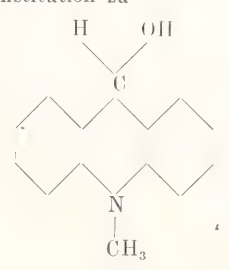
d. h. Säuremolekül und Halogenalkyl stehen durch eine Nebenvalenz in Bindung mit dem an und für sich dreiwertigen N, dessen 4. Koordinationsstelle sie besetzen.

Mit Hilfe dieser Anschauung läßt sich eine Erklärung für die Tatsache geben, daß Akridiniumsalze in verschieden gefärbten, deshalb nach Hantzsch als chromoisomer zu bezeichnenden Formen auftreten. Es handelt sich hierbei offenbar um eine verschiedenartige Betätigung der Haupt- und Nebenvalenzen des Stickstoffs (Valenzisomerie). Die ionisierbaren, also im Sinne von Werner in der 2. Sphäre in bezug auf das N-Atom befindlichen Säureradikale vermögen nämlich in die 2. Sphäre des Mesokohlenstoffatoms zu wandern, so daß für diese — tiefer gefärbten — Modifikationen der Akridiniumsalze die Formeln

Akridinjodhydrat u. Akridinjodmethylat

von Hantzsch (Ber. 44 1783) aufgestellt worden sind. Die Möglichkeit der Entstehung solcher chromoisomerer Formen, die übrigens — in Analogie zu v. Baeyers Darlegungen in der Triphenylmethanreihe — als „Carboniumverbindungen“ aufgefaßt werden könnten, wirft auch Licht auf die längst bekannte Tatsache, daß Akridiniumsalze durch Alkalien in sogenannte Pseudobasen übergeführt werden, die man auch als Akridole bezeichnet. Sie sind Abkömmlinge von Dihydroakridinen mit am Kohlenstoff fixiertem Hydroxyl. Dies geht zur Evidenz aus dem Vergleich der bis ins Ultraviolett verfolgten Spektra derartiger Verbindungen mit denen analoger Dihydroakridinderivate hervor. So haben z. B. Dobbie und Tinkler (Journ. Chem. Society 87 269) gezeigt, daß die Absorptionskurve der aus dem Mesophenylakridiniummethyljodid entstehenden Pseudobase nahezu vollkommen identisch ist mit der des Dihydro-mesophenyl-n-methylakridins.

Dem Akridanol kommt also unzweifelhaft folgende Konstitution zu



Aehnliches gilt für die von Akridiniumverbindungen derivierenden Pseudocyanide.

Uebrigens kann man noch einen weiteren Beweis für die Existenzmöglichkeit der „Carboniumform“ der Akridiniumsalze darin erblicken, daß sie sich mit Grignardschem Reagens (Alkyl- und Arylmagnesiumhalogeniden) zu Dihydroakridinderivaten vom allgemeinen Typus

umsetzen (Ber. 42 1746).

Zur Kennzeichnung der Dihydroakridine sei bemerkt, daß sie farblose gut kristallisierende Substanzen darstellen, die gar keinen basischen Charakter mehr besitzen, dagegen die Tendenz zeigen, wieder rückwärts in Akridine überzugehen.

Man könnte dies so erklären, daß das N-Atom mit seiner Nebenvalenz einen Koordinationspunkt des Meso-C-Atoms besetzt, wodurch ein H-Atom nach der 2. Sphäre zu abgedrängt werden muß. Der Stickstoff könnte dann in der Tat keine Fähigkeit mehr haben, Säuremoleküle zu addieren, während andererseits das Vorhandensein labiler, also leicht oxydierbarer Wasserstoffatome, erklärt wäre.

Ueber die allgemeinen Eigenschaften der Akridone ist zu sagen, daß sie sehr beständige, gelb gefärbte, unzersetzt destillierbare, mit ausnehmend starker Fluoreszenz begabte Substanzen darstellen. In chemischer

Hinsicht verhalten sie sich meistens wie wahre Ketone. Sie kondensieren sich beispielsweise mit Dimethyanilin bei Gegenwart von Phosphoroxychlorid zu meso-Phenylakridinderivaten (Ber. 40 4795) z. B.

$N(CH_3)_2$

C

N

Ferner liefern sie mit Magnesiumorganischen Verbindungen dieselben Akridanole, die aus Akridiniumsalzen mit Alkalien entstehen (Ber. 37 575), z. B.

$$C_6H_4\begin{matrix} C{=}O \\ N{-}R \end{matrix}C_6H_4 + C_6H_5MgBr + HBr$$

$$= C_6H_4\begin{matrix} C(HO)(C_6H_5) \\ N{-}R \end{matrix}C_6H_4 + MgBr_2$$

Akridone lassen sich auch in Akridiniumsalze verwandeln, wenn man sie erst durch Reduktion mit Natrium und Amylalkohol in Dihydroakridine überführt, denen man nachher durch Jod wieder Wasserstoff entzieht. Auf diesem Wege sind sogar die sonst nicht zugänglichen N-Arylakridiniumsalze zu gewinnen.

So liefert N-Phenylakridon (zu erhalten aus Triphenylamin-o-carbonsäure) leicht Phenylakridiniumperjodid (Ber. 40 2515)

O
C
N
C_6H_5

→ CH_2 N .

→ C_6H_5 H J_3 C N C_6H_5

bzw. H C N C_6H_5-J_3

5. Spezielle Beschreibung wichtiger Verbindungen. Im folgenden sollen einige wenige, besonderes Interesse erregende Akridinderivate einzeln kurz besprochen werden.

1. Akridin $C_{13}H_9N$, von Graebe und Caro (Ann. 158 265, Ber. 3 746, Ber. 13 99) aus der zwischen 300° bis 360° siedenden Fraktion des Steinkohlenteers in Gestalt des Chromats erhalten, ist leicht synthetisch nach den oben sub 3 1 und 2 angegebenen Methoden zu gewinnen. Es bildet fast farblose Blättchen oder Nadeln vom Fp. 111°. Sein Dampf reizt die Schleimhäute sehr stark. Die Lösungen — insbesondere die ätherische — zeigen intensiv blaue Fluoreszenz.

Die gelb gefärbten Salze sind teilweise hydrolysierbar. Charakteristisch ist das Sulfit $(C_{13}H_9N)_2H_2SO_3$, das sich beim Einleiten von SO_2 in eine salzsaure Lösung der Base als gelblichroter Niederschlag ausscheidet. Durch Licht erleidet Akridin eine merkwürdige, durch Wärme rückläufig zu gestaltende Polymerisierung zu einer gelben Substanz vom Fp. 276° (Analogie mit Anthracen).

2. Pheno 1,2 naphthakridin bildet gelbliche Kristalle vom Fp. 131°, darstellbar nach Synthese 3 2 c.

3. Pheno 2, 1 naphtakridin wird ebenfalls in schwach gelben Nadeln vom Fp. 108° erhalten nach Synthese 3 3.

4. 1, 2, 1′, 2′ Dinaphtakridin, gelbe Nadeln vom Fp. 216° und

5. 1, 2, 2′, 1′ Dinaphtakridin, ebenfalls gelbe Kristalle vom Fp. 228°, können beide nach Synthese 3 2b dargestellt werden und zeichnen sich durch intensive, tiefblaue Fluoreszenz sowie besonders durch schöne Triboluminieszenz aus (Morgan Chem. News 92 219). Die bernsteinfarbenen Kristalle

emittieren nämlich beim Pulverisieren ein lebhaftes, gelbliches Licht. Akridin selbst zeigt diese Erscheinung nicht.

6. ms-Phenylakridin, Fp. 181°, aus Diphenylamin und Benzoesäure, siedet unzersetzt bei 408° und bildet farblose aus Benzol mit Kristallbenzol sich abscheidende Blättchen.

7. Technische Bedeutung haben im wesentlichen nur Aminoderivate des Akridins erlangt, da sie als basische, gelbe bis gelbrote Nuancen erzeugende Farbstoffe in der Textilindustrie und teilweise auch in der photographischen Industrie zum Sensibilisieren der Platten Verwendung finden. Da die Farbstoffe anderweitig genauer beschrieben werden (vgl. den Artikel „Farbstoffe"), sollen hier nur die Konstitutionsformeln der wichtigsten dieser Produkte nebeneinander gestellt werden.

a) H_3C CH CH_3

H_2N N NH_2

Diaminodimethylakridin = Akridingelb.

b) CH

$(CH_3)_2N$ N $N(CH_3)_2$

Tetramethyldiaminoakridin = Akridinorange.

c) NH_2

C

N NH_2

ms-4'-Aminophenyl-3-aminoakridin = Chrysanilin oder Phosphin (Nebenprodukt der Fuchsindarstellung).

d)

C

H_3C CH_3

H_2N N NH_2

Diaminodimethylphenylakridin = Benzoflavin.

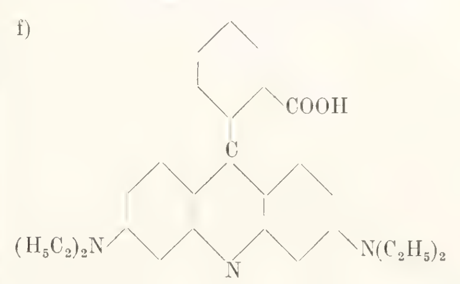
e) $N(CH_3)_2$

C

H_2N N $N(CH_3)_2$

Tetramethyltriamino-ms-phenylakridin = Rheonin.

f)



Tetraäthyldiamino-ms-phenylakridin-o-carbonsäure = Flaveosin.

Alle diese Farbstoffe bilden leicht wasserlösliche, gelbe bis gelbrote Salze. Die freien Basen lösen sich in Aether mit gelbgrüner Fluoreszenz, die auch für die Ausfärbungen auf Seide charakteristisch ist.

8. Dihydroakridin, $C_{13}H_{11}N$ entsteht leicht durch Reduktion des Akridins und bildet farblose Säulen vom Fp. 169° ohne irgendwelche basischen Eigenschaften.

9. Akridon, darstellbar nach Synthese 3 5, bildet gelbe Nadeln vom Fp. 354°, die sich in Alkohol mit äußerst intensiver, blauer Fluoreszenz lösen. Verwandelt sich bei der Einwirkung von PCl_5 in ms-Chlorakridin Fp. 119°, mit labilem Chloratom.

10. n-Methylakridon, Fp. 203°, entsteht leicht durch Oxydation des zugehörigen, aus Akridiniummethyljodid mit Alkalien entstehenden Akridanols.

Literatur. *Die grundlegenden Forschungen auf dem Gebiete der Akridinchemie finden sich vorwiegend in den Originalarbeiten der drei folgenden Autoren:* ***Graebe, Bernthsen*** *und* ***Ullmann.*** *Nächstdem haben* ***Decker, O. Fischer*** *und* ***Senier*** *wichtige Beiträge geliefert. — Zusammenfassende Ueberblicke über die Akridingruppe, die allerdings nicht mehr den modernsten Stand der Wissenschaft repräsentieren, finden sich bei* ***Richter,*** *Organische Chemie II. Bd., Bonn 1905 und bei* ***Brühl,*** *Chemie der sechsgliedrigen heterocyklischen Systeme, Braunschweig 1899. — Eine Zusammenstellung der technisch wichtigen Akridinderivate gibt* ***Winther,*** *Patente der organischen Chemie, Gießen 1908, Bd. II S. 233ff.*

W. König.

Akkumulatoren

(„Sammler") sind Vorrichtungen, in denen elektrische Energie aufgespeichert werden kann, die nur ein System im Bedarfsfall wieder als elektrische Energie zu entnehmen vermag. Das Nähere ist im Artikel „Galvanische Ketten" besprochen.

Albertus Magnus

Graf von Bollstädt.

Geboren 1193 zu Lauingen in Schwaben; gestorben 1280 zu Köln. Einer der gelehrtesten und kenntnisreichsten Männer des 13. Jahrhunderts. Er gehörte dem geistlichen Stande an. Neben seinen theologischen und moralischen Schriften hat er Bedeutendes auf dem Gebiete der Naturwissenschaft geschaffen. Als besonderes Verdienst muß es ihm angerechnet werden, die aristotelischen Schriften in eine nicht nur formelle Uebereinstimmung mit dem Kirchenglauben gebracht zu haben, wodurch sie, was Albertus Magnus klar erkannte, einen bedeutenden Einfluß auf das Denken der damaligen Zeit ausüben mußten. Die Schriften naturwissenschaftlichen, speziell zoologischen Inhalts gehen in der Hauptsache kaum über Aristoteles, den er zu kommentieren unternommen hatte, hinaus. Der Einfluß von Albertus Magnus auf die Nachwelt ist nicht so stark gewesen, wie man erwarten sollte; das liegt aber hauptsächlich an der theologisierenden Richtung bei der Abfassung seiner naturwissenschaftlichen Werke. Gesammelt sind die Werke Alberts zuerst (leider nicht vollständig) von Saming (21 Bde Lyon 1651). Der 6. Band dieses Gesamtwerkes betrifft die Tiere und ist in 26 Bücher geteilt, wovon 19 dem Aristoteles zugeschrieben werden müssen.

Literatur. ***Sighart,*** *Albertus Magnus, Regensburg 1857.* — ***von Hertling,*** *Albertus Magnus, Festschrift, Köln 1881.* — ***van Weddingen,*** *Étude critique sur la philosophie d'Albertus le Grand, Brüssel 1881.*

W. Harms.

Albumine und Albuminoide

werden unter „Eiweißkörper" (und „Tierstoffe") behandelt.

Aldehyde.

1. Allgemeines. 2. Bildungsweisen. 3. Physikalische Eigenschaften. 4. Chemisches Verhalten. 5. Spezielle Aldehyde: a) Gesättigte Aldehyde der Fettreihe; b) Ungesättigte Aldehyde der Fettreihe; c) Dialdehyde; d) Oxyaldehyde; e) Aromatische Aldehyde; f) Heterozyklische Aldehyde.

1. Allgemeines. Die Aldehyde sind organische Verbindungen, die die Atomgruppe $-C{\lessgtr}^{O}_{H}$ enthalten. Sie bestehen also aus einer Carbonylgruppe (CO), die einerseits mit einem Wasserstoffatom, andererseits mit einem Kohlenwasserstoffrest verknüpft ist. Tritt statt des Wasserstoffatoms ein Alkyl-Radikal ein, so entstehen Ketone, die demnach eigentlich als sekundäre Aldehyde zu bezeichnen sind in Analogie zu den sekundären Alkoholen

$CH_3.HC(OH)-H$ primärer Alkohol	$CH_3.CO-H$ Aldehyd
$CH_3.CH(OH)-CH_3$ sekundärer Alkohol	$CH_3.CO-CH_3$ Keton (sekundärer Aldehyd)

Man kann die Aldehyde und auch die Ketone als Anhydride unbeständiger zweiwertiger Alkohole betrachten, bei denen die beiden Hydroxylgruppen an einem Kohlenstoffatom stehen (1,1-Glycole)

$$CH_3.C(H){<}^{OH}_{OH} = CH_3.C{\lessgtr}^{O}_{H} + H_2O.$$

In vereinzelten Fällen kann man solche Alkohole isolieren. In Form ihrer Aether (Acetale) sind sie jedoch durchaus beständig

$$CH_3.C{<}^{OC_2H_5}_{OC_2H_5}.$$

Der allgemeine Name „Aldehyd" wurde von Liebig gebildet und ist aus „Alkohol dehydrogenatus" zusammengezogen; er soll andeuten, daß diese Substanz aus einem Alkohol durch Wasserstoffentziehung entstanden ist. Da die Aldehyde die Zwischenglieder zwischen den Alkoholen und den entsprechenden Säuren bilden

$CH_3.CH_2OH$	$CH_3.C{\lessgtr}^{O}_{H}$	$CH_3.C{\lessgtr}^{O}_{OH}$
Alkohol	Aldehyd	Säure

kann man die einzelnen Aldehyde so benennen, daß sie als Derivate des entsprechenden Alkohols oder der Säure erscheinen. So heißen die Aldehyde

$CH_3.C{\lessgtr}^{O}_{H}$ Aethylaldehyd oder Acetaldehyd

$CH_3.CH_2.C{\lessgtr}^{O}_{H}$ Propylaldehyd oder Propionaldehyd.

Beide Namen sind in Gebrauch, doch ist der von den Säuren abgeleitete vorzuziehen. Denn der Aldehyd $CH_3.C{\lessgtr}^{O}_{H}$ enthält wohl eine Acetylgruppe ($CH_3.C=O$) dagegen keine Aethylgruppe (C_2H_5). Darum erscheint der Name „Acetaldehyd" korrekter als „Aethylaldehyd". Nach den Beschlüssen des Genfer Nomenklaturkongresses sollen die Aldehyd-Namen so gebildet werden, daß man an den Namen des Kohlenwasserstoffes, von dem die Aldehyde stammen, die Silben al anhängt: CH_2O Methanal, $CH_3.CHO$ Aethanal, $C_2H_5.CHO$ Propanal usw. Beachtenswert ist, daß die Aldehyde isomer sind mit den Ketonen, den Olefinalkoholen und den zy-

klischen Aethern von gleicher Kohlenstoffzahl. Es sind z. B. isomer

$CH_3.CH_2.C\langle^{O}_{H}$ Popionaldehyd — $CH_3.CO.CH_3$ Aceton

$CH_2 = CH.CH_2OH$ Allylalkohol — $CH_2\langle^{CH_2}_{CH_2}\rangle O$ Trimethylenoxyd

2. Bildungsweisen. Da die Aldehyde zu den reaktionsfähigsten Substanzen gehören und mit das wichtigste Baumaterial zur organischen Synthese bilden, sind Methoden zu ihrer Darstellung besonders fleißig ausgearbeitet worden und man ist immer noch bemüht, neue Wege zu finden.

Aldehyde entstehen:

1. Durch Oxydation primärer Alkohole. Als Oxydationsmittel dient Schwefelsäure und Chromsäure oder Braunstein, oder der Luftsauerstoff bei Gegenwart von Kontakt-Substanzen (Platinschwamm, glühendes Kupfer). Auch Halogene können oxydierend wirken. Die Ausbeuten sind nur bei solchen Aldehyden gut, welche dem Reaktionsgemisch durch ihre Flüchtigkeit leicht entzogen werden können; im anderen Fall oxydieren sich die Aldehyde leicht weiter zu den Carbonsäuren und diese verbinden sich mit dem unverbrauchten Alkohol zu Estern.

2. Durch einfaches Glühen von Alkoholdämpfen, wobei Wasserstoff frei wird

$$R.CH_2.OH = R.C\langle^{O}_{H} + H_2$$

Diese Dehydrogenation der Alkohole wird durch pulverförmiges reduziertes Kupfer sehr begünstigt, doch gelingt die Reaktion nur in einzelnen Fällen.

3. Durch Erhitzen der Calciumsalze organischer Säuren mit ameisensaurem Calcium

$$\begin{matrix}CH_3.COO\\CH_3.COO\end{matrix}\rangle Ca + \begin{matrix}H.COO\\H.COO\end{matrix}\rangle Ca = 2CaCO_3 + 2CH_3.C\langle^{O}_{H}$$

Bei hochmolekularen Aldehyden nimmt man besser die Bariumsalze und führt die Destillation im Vakuum aus. Die Reaktion geht meistens nicht sehr glatt vor sich; es entstehen immer eine Reihe von Nebenprodukten. So bildet sich durch Reduktionswirkung des Formiates stets auch der zugehörige Alkohol. Verwendet man statt des ameisensauren Calciums das entsprechende Salz einer anderen Fettsäure, so entstehen Ketone.

4. Durch Reduktion von Säuren und Säurederivaten (Säurechloride, Säureanhydride) mit naszierendem Wasserstoff. Doch gelingt die Reaktion schwer, da sich der Aldehyd leicht weiter reduziert. Man hilft sich hier durch Zusatz einer Base, z. B. Phenylhydrazin, die mit dem Aldehyd leicht ein Kondensationsprodukt bildet und ihn so vor weiteren chemischen Angriffen schützt.

5. Durch Hydrolyse aus einer Reihe von Aldehydederivaten, ein Prozeß, der zur Reindarstellung von Aldehyden oft sehr wichtig ist. So spalten die Hydrazone und Oxime, die Aldehydammoniak- und Aldehydbisulfitverbindungen sich durch Behandeln mit verdünnten Säuren leicht in ihre Komponenten

$$R.CH_2.CH:N.NH.C_6H_5 + H_2O = R.CH_2.C\langle^{O}_{H} + NH_2.NH.C_6H_5$$

Ebenso geben die Acetale leicht mittels verdünnter Alkalien oder Säuren Aldehyde

$$CH_3.CH\langle^{OC_2H_5}_{OC_2H_5} \longrightarrow CH_3.CH\langle^{OH}_{OH} \longrightarrow CH_3-C\langle^{O}_{H}$$

Nicht existenzfähiges 1.1-Glycol

Ferner liefern die Alkylidendichloride beim Erhitzen mit Wasser (am besten bei Gegenwart von Bleioxyd) leicht die entsprechenden Aldehyde

$$R.CHCl_2 + H_2O = R.CHO + 2\,HCl$$

Auch hier muß man als Zwischenprodukt unbeständige 1,1-Glycole annehmen.

6. Durch Behandeln von 1,2-Glycolen und ihren Derivaten (Aether, Alkylenoxyde) mit Chlorzink, Phosphorpentoxyd, Schwefelsäure u. a. bei höherer Temperatur. Es findet wahrscheinlich hierbei zunächst Wasserentziehung und dann Umlagerung statt

$$\begin{matrix}CH_2-OH\\|\\CH_2-OH\end{matrix} \longrightarrow \begin{matrix}CH_2\\|\\CH_2\end{matrix}\rangle O \longrightarrow \begin{matrix}CHO\\|\\CH_3\end{matrix}$$

7. Magnesiumhalogenalkyl-Verbindungen lassen sich auch zum synthetischen Aufbau von Aldehyden verwenden. So vereinigt sich Orthoameisensäureäthylester mit ihnen zu Acetalen, die sich leicht verseifen lassen:

$$CH_3.Mg.Br + HC(OC_2H_5)_3 = H.C(CH_3).(OC_2H_5)_2 + Br.Mg.OC_2H_5$$

$$H_2O + H\,C(CH_3).(OC_2H_5)_2 = H.C(CH_3)O + 2\,C_2H_5OH$$

Auch gewöhnlicher Ameisensäureester (im Ueberschuß angewendet) läßt Aldehyde entstehen

$$H.C\langle^{O}_{OC_2H_5} + CH_3.MgBr = H.C\langle^{O}_{CH_3} + MgBr.OC_2H_5$$

Mitunter kann man Ameisensäure selbst oder ihre Salze anwenden. Auch die Dialkylformamide $H.C\langle^{O}_{N\langle^{R}_{R}}$ geben diese Reaktion.

8. Eine eigentümliche Methode zur Gewinnung von Aldehyden bietet die Oxydation primärer Amine in wässeriger Lösung durch den Luftsauerstoff bei Gegenwart von Kupferpulver

$$CH_3.CH_2.NH_2 + O_2 + Cu = CH_3.C\begin{smallmatrix}/O\\ \backslash H\end{smallmatrix} + CuO + NH_3$$

9. Durch Reduktion von ungesättigten Nitro-Verbindungen $(R)_2C = CH.NO_2$ entstehen Aldoxime $(R)_2CH - CH = NOH$, welche bei der hydrolytischen Spaltung (s. 25) Aldehyde liefern.

10. Aus α-Oxycarbonsäuren R.CH(OH) — COOH lassen sich Aldehyde erhalten durch Abspaltung von Kohlenoxyd und Wasser oder Ameisensäure

$$R.CH\begin{smallmatrix}/OH\\ \backslash CO\,OH\end{smallmatrix} = R.CHO + CO + H_2O$$

Die Spaltung wird bei niederen Gliedern durch Schwefelsäure, bei den höheren Homologen durch einfaches Erhitzen bewirkt. Die Reaktion ist sehr wichtig, da man die α-Oxysäuren leicht aus den Fettsäuren durch Bromieren und darauf folgendes Behandeln mit Alkali erhalten kann. Es entsteht also aus der Fettsäure der Aldehyd von nächstniederer Kohlenstoffzahl und da man den letzteren wieder leicht zu einer Carbonsäure oxydieren kann, bietet die Methode eine Möglichkeit, Carbonsäuren und Aldehyde schrittweise immer um ein Kohlenstoffatom abzubauen.

11. Aehnlich liefern die Glycidcarbonsäuren (Alkylenoxydcarbonsäuren) beim Erhitzen Aldehyde

$$\begin{smallmatrix}R\\R\end{smallmatrix}\!>\!C - CH - COOH \rightarrow \quad (C, CH \text{ über } O \text{ verbunden})$$

$$\begin{smallmatrix}R\\R\end{smallmatrix}\!>\!CH - CHO + CO_2$$

12. Weiterhin lassen sich Aldehyde darstellen durch Abbau-Reaktion aus den Ozoniden, die sich bei Einwirkung von ozonisiertem Sauerstoff auf Olefine bilden. Die Ozonide zerfallen bei der Behandlung mit Wasser in zwei Mol Aldehyde

$$R.CH = CH.R \rightarrow R.CH - CH.R \; (\text{über } O_2 \text{ verbunden})$$

Ozonid

$$\rightarrow R.C\begin{smallmatrix}/O\\ \backslash H\end{smallmatrix} + \begin{smallmatrix}O\\H\end{smallmatrix}\!>\!C-R$$

13. Theoretisch wichtig, praktisch allerdings bisher von geringer Bedeutung ist die Entstehung von Aldehyd aus den Acetylenkohlenwasserstoffen durch Wasseranlagerung

$$\begin{matrix}CH\\ \|\\ CH\end{matrix} + \begin{matrix}OH\\ |\\ H\end{matrix} = \begin{matrix}CHO\\ |\\ CH_3.\end{matrix}$$

Die Hydratation wird bewirkt durch Schwefelsäure oder durch direktes Erhitzen mit Wasser auf ca. 320 °. Auch die Verbindungen der Acetylenkohlenwasserstoffe mit Salzen werden durch verdünnte Säuren unter Hydratation d. i. Aldehydbildung zerlegt.

3. Physikalische Eigenschaften. Der Formaldehyd ist ein Gas, die nächsten Glieder der Aldehydreihe flüssig, die höheren Homologen fest. Die Aldehyde sind Substanzen von obstähnlichem oder blumenartigem charakteristischen Geruch. Die niederen Glieder lösen sich in Wasser, die höheren nicht. Die Siedepunkte zeigen ein regelmäßiges Ansteigen, die Siedepunktsdifferenz für eine CH_2-Gruppe ist aber bemerkenswerter Weise größer als gewöhnlich, nämlich ca. 26 statt 19.

	Sdp.	Diff.
$CH_3.CHO$	20.8	
		28
$CH_3.CH_2.CHO$	48.8	
		25.2
$CH_3(CH_2)_2CHO$	74	
		28
$CH_3(CH_2)_3CHO$	102	
		26
$CH_3(CH_2)_4CHO$	128	
		27
$CH_3(CH_2)_5CHO$	155	

Die Molekularvolumina steigen ziemlich regelmäßig um ca. 21 für eine CH_2-Gruppe bei den Siedepunkten. Bei der Berechnung der Molekularvolumina aus dem Atomvolumen erhält der Carbonylsauerstoff der Aldehyde (und auch der Ketone) einen besonderen Wert (12,2) im Gegensatz zum Hydroxylsauerstoff (7,8). Aehnliche Verhältnisse ergeben sich bei der Molekularrefraktion. Die Atomrefraktion für den Sauerstoff in den Aldehyden hat den Wert 2,328, während dem Hydroxylsauerstoff 1,506, dem Aethersauerstoff 1,655 zugeschrieben wird. Die Zähigkeit der Aldehyde (ebenso wie die der Ketone) ist geringer als die der entsprechenden Alkohole, die Oberflächenspannung nicht viel von der jener verschieden. Die Verbrennungswärme zeigt wie andere homologe Reihen regelmäßiges Ansteigen um ca. 157 Kg. Cal. für eine CH_2-Gruppe. Beim Uebergang der Alkohole in die Aldehyde findet eine ziemlich konstante Wärmeentwickelung statt. Der Unterschied der Bildungswärmen für entsprechende Aldehyd-Alkohol-Paare beträgt im Mittel 9,4 Cal. Die Oxydationswärme ergibt sich nach Abzug dieses Wertes von 57,6 Cal. (der Bildungswärme des gleichzeitig entstandenen Wassers) also im Mittel 48,2 Cal. (Thomsen). Die Dielektrizitätskonstanten für die Aldehyde sind etwas kleiner wie die der entsprechenden Alkohole, bedeutend größer als die der zugehörigen Säuren. In Übereinstimmung hierzu sind die Aldehyde ziemlich beträchtlich dissozierende Lösungsmittel. Die äquivalenten Leitfähigkeiten weisen aber mit steigender Verdünnung kein Anwachsen, sondern regelmäßige Abnahme oder periodischen Gang auf, eine Tatsache, die sich vielleicht durch chemische Wechselwirkung infolge der enormen Reaktionsfähigkeit der Aldehyde (s. 4) er

klären läßt. Die Aldehyde der Fettreihe zeigen in Dampfform Leuchteffekte unter dem Einfluß von Tesla-Strömen, eine Eigenschaft, die den übrigen Verbindungen der Fettreihe abgeht, und die sonst nur bei aromatischen und heterozyklischen Verbindungen häufiger beobachtet wird (Kauffmann).

4. **Chemisches Verhalten.** Die Aldehyde sind, wenigstens im gewöhnlichen Sinne, indifferente Substanzen, die nicht auf Indikatoren reagieren. Genauere elektrochemische Messungen haben gezeigt, daß sie in wässeriger Lösung Wasserstoffionen bilden, also als schwache Säuren fungieren. Demgegenüber können die Aldehyde wieder mit einigen Säuren und Salzen lockere Additionsverbindungen bilden, in denen sie anscheinend basische Eigenschaften haben (vgl. den Artikel „Sauerstoff").

1. Die Aldehyde sind außerordentlich leicht oxydierbar und gehen dabei in die Carbonsäuren von gleicher Kohlenstoffzahl über. Manche Aldehyde nehmen den Sauerstoff direkt aus der Luft auf und bilden superoxydähnliche Gebilde, die schließlich in die Säuren übergehen. Infolge der leichten Oxydierbarkeit sind die Aldehyde kräftige Reduktionsmittel. Sehr charakteristisch ist diese Reduktionsfähigkeit gegenüber alkalischen Silbersalzlösungen, wobei sich das Silber in Form eines glänzenden Ueberzugs (Silberspiegel) abscheidet (Unterschied von den Ketonen). Von anderen charakteristischen Reaktionen ist die Rotfärbung von Fuchsin-Schweflige-Säure-Lösung bemerkenswert. Ferner kann man Aldehyde, welche gegen Alkalien beständig sind, auch mittels Diazobenzolsulfosäure und etwas Natriumamalgam in alkalischer Lösung nachweisen: es tritt hierbei eine rotviolette Färbung auf. Eine sehr allgemeine und empfindliche Reaktion ist die Bildung von Hydroxamsäuren $R.C\langle{}^{NOH}_{OH}$ aus den Aldehyden und Nitrohydroxylaminsäuresalzen z. B. HON = NOONa. Die Hydroxamsäuren sind durch ihre Rotfärbung mit Eisenchlorid leicht nachzuweisen.

2. Eine ganze Reihe von Aldehyd-Reaktionen ist auf den ungesättigten Charakter der Carbonyl-Gruppe zurückzuführen. So zeigen die Aldehyde eine starke Additionsfähigkeit. Durch Addition von Wasserstoff entstehen primäre Alkohole

$$CH_3.C\langle{}^{O}_{H} + H_2 = CH_3.CH_2.OH.$$

Manche, besonders halogensubstituierte Aldehyde addieren Wasser unter Bildung von Hydraten

$$\underset{\text{Chloral}}{CCl_3.C\langle{}^{O}_{H}} + H_2O = \underset{\text{Chloralhydrat}}{CCl_3.CH\langle{}^{OH}_{OH}}$$

Durch Vereinigung mit Säureanhydriden entstehen Ester von 1,1-Glycolen

$$CH_3.CHO + {}^{C_2H_3O}_{C_2H_3O}\rangle O = CH_3.CH\langle{}^{O.C_2H_3O}_{O.C_2H_3O}$$

Mit Alkalibisulfiten vereinigen sich die Aldehyde leicht zu kristallinischen Additionsverbindungen, die in Wasser gut, in konzentrierter Sulfitlauge und in Alkohol schwer löslich sind

$$CH_3.CHO + SO_3NaH = CH_3.CH\langle{}^{OH}_{O.SO_2Na}$$

Diese Reaktion ist für Aldehyde und auch für die meisten Ketone sehr charakteristisch und man kann sie zu ihrer Isolierung und Reinigung sehr gut verwenden, da die entstandenen Produkte durch Erwärmen mit verdünnten Mineralsäuren leicht wieder in ihre Komponenten gespalten werden.

Durch Addition von Blausäure an die Aldehyde entstehen sogenannte „Cyanhydrine", d. s. Nitrile von α-Oxysäuren, welche sich leicht zu den Oxysäuren selbst verseifen lassen

$$CH_3.CHO + CNH = \underset{\text{Cyanhydrin}}{CH_3.CH\langle{}^{CN}_{OH}} \longrightarrow \underset{\text{Milchsäure}}{CH_3.CH\langle{}^{COOH}_{OH}}$$

Die Reaktion führt vom Aldehyd zu einer Säure von nächst höherer Kohlenstoffzahl und stellt somit ein wichtiges synthetisches Hilfsmittel dar.

Magnesiumhalogenalkylverbindungen vereinigen sich mit den Aldehyden zu Additionsprodukten, welche beim Behandeln mit Wasser sekundäre Alkohole liefern

$$CH_3.C\langle{}^{O}_{H} + Mg\langle{}^{C_2H_5}_{Br} = CH_3.C{}^{\diagup C_2H_5}_{\diagdown H}\!-O.MgBr \longrightarrow CH_3.CH{}^{\diagup C_2H_5}(OH)$$

Häufig sind die Additionsreaktionen an die Carbonylgruppe von einer Wasserabspaltung gefolgt, so daß der Prozeß schließlich auf den Austausch des Carbonylsauerstoffes gegen eine zweiwertige oder zwei einwertige Gruppen hinausläuft; Ammoniak addiert sich direkt mit den Aldehyden zu Aldehyd-Ammoniaken.

$$CH_3.C\langle{}^{O}_{H} + NH_3 = CH_3.C{}^{\diagup NH_2}_{\diagdown H}\!-OH$$

Bei substituierten Ammoniaken (Aminen) wird jedoch bei dieser Reaktion Wasser abgespalten und es entstehen Aldehydimide

$$CH_3.CHO + NH_2.R = CH_3.CH = N.R$$

Von diesen Verbindungen sind die be-

sonders wichtig, die sich von Hydroxylamin und Phenylhydrazin ableiten und die Oxime (Aldoxime) und Phenylhydrazone genannt werden

$$CH_3.CHO + NH_2.OH = CH_3.CH{:}N.OH + H_2O$$
Aldoxime

$$CH_3.CHO + NH_2.NHC_6H_5 = CH_3.CH{:}N.NH.C_6H_5 + H_2O$$
Phenylhydrazon

Es sind dies gut krystallisierende Verbindungen, die man zur Charakterisierung oder Isolierung der Aldehyde gern verwendet, und welche durch Säuren leicht wieder in die Komponenten zerlegt werden können. Auch viele andere Basen (Semicarbazid, Amidophenole, p-Amido-dimethylanilin) liefern ähnliche charakteristische Kondensationsprodukte.

Mit Alkoholen treten die Aldehyde zu Acetalen zusammen

$$CH_3.CHO + 2C_2H_5.OH = CH_3.CH\begin{matrix}\diagup OC_2H_5\\ \diagdown OC_2H_5\end{matrix} + H_2O,$$

mit Merkaptanen ebenso zu Merkaptalen

$$CH_3.CH\begin{matrix}\diagup SC_2H_5\\ \diagdown SC_2H_5\end{matrix}$$

Phosphorpentachlorid bewirkt Ersatz der Carbonyl-Sauerstoffs durch 2 Cl

$$CH_3.CHO + PCl_5 = CH_3.CH.Cl_2 + POCl_3.$$

Durch freie Halogene dagegen werden nur die Wasserstoffatome der Alkylgruppe in den Aldehyden substituiert.

Die Aldehyde, namentlich die niederen Homologen, zeigen eine große Neigung sich zu polymerisieren, eine Eigenschaft die auf die starke Additionsfähigkeit der Substanzen zurückzuführen ist

$$3R.CHO \longrightarrow R.CH\begin{matrix}\diagup O-CH\diagup R\\ \diagdown O-CH\diagdown R\end{matrix}\!\!\!>O.$$

Die entstandenen Verbindungen heißen Paraldehyde und Metaldehyde. Ihre Bildung wird häufig durch geringe Mengen katalytisch wirkender Agentien (HCl, H_2SO_4, $ZnCl_2$) sehr begünstigt.

Die Carbonylgruppe hat außer der Additionsfähigkeit noch die Eigenschaft, die Wasserstoffatome in der benachbarten Methylengruppe reaktionsfähiger (beweglicher) zu machen. Diese „auflockernde" Wirkung zeigt sich besonders deutlich, wenn die Methylengruppe zwischen zwei Carbonylgruppen steht: $-CO-CH_2-CO-$. Aber auch bei einer Carbonylgruppe ist die Reaktionsfähigkeit der Methylengruppe so groß, daß sie Veranlassung zu einer Reihe bedeutungsvoller Kondensationsvorgänge bei den Aldehyden wird. 2 Mol Aldehyd verbinden sich zu einem Aldehyd-Alkohol (Aldol)

$$2CH_3.CHO = CH_3.C\begin{matrix}\diagup OH\\ -CH_2.CHO\\ \diagdown H\end{matrix}$$

Als kondensierende Mittel dienen Mineralsäuren, Chlorzink und besonders **alkalische** Agentien wie Natriumäthylat, Alkalilauge, Cyankalium u. a. Natriumacetat-, Natriumkarbonatlösung. Häufig wirken bei dieser Reaktion („Aldolkondensation") die genannten Agentien noch Wasser abspaltend und es entstehen ungesättigte Aldehyde

$$CH_3.\overset{OH}{CH}-CH_2-CHO = CH_3.CH{:}CH.CHO + H_2O$$

Ähnlich führt die Einwirkung der Aldehyde auf Ketone zu α-β ungesättigten Ketonen

$$C_6H_5.CHO + CH_3.CO.CH_3 = C_6H_5.CH{:}CH.CO.CH_3$$

Die Aldolbildung findet nicht statt, wenn die CO-Gruppe mit einem tertiären Kohlenstoffatom verbunden ist. Mitunter führt die Einwirkung von konzentrierten Alkalilaugen noch zu anderen Produkten. So liefert der Acetaldehyd und einige Homologe sogenanntes „Aldehydharz", gelbbraune harzige Massen von noch ungeklärter Konstitution. Andere Aldehyde, besonders die aromatischen und solche die zur Aldol-Bildung nicht befähigt sind, zerfallen in Säure und Alkohol

$$2\,C_6H_5.CHO + KOH = C_6H_5.CH_2 + C_6H_5.COOK$$
Benzaldehyd — Benzylalkohol — Benzoesäures Kalium

Von weiteren Aldehydreaktionen verdient noch das Verhalten gegen Diazomethan Erwähnung, das zu Ketonen führt

$$R.C\begin{matrix}\diagup O\\ \diagdown H\end{matrix} + CH_2N_2 = R.CO-CH_3 + N_2.$$

Die vorstehend geschilderte Reaktionsfähigkeit der Aldehyde zeigt ihre große Bedeutung für ihre Synthese. Da viele von den Reaktionen bei gewöhnlicher Temperatur glatt verlaufen, ist ihre Bedeutung für die physiologische Chemie nicht zu verkennen. Vielleicht beruht ein großer Teil der für den Lebensprozeß wichtigen chemischen Vorgänge in den Organismen auf dem Vorhandensein von Aldehyd-Gruppen in den Plasmaproteinen.

5. Spezielle Aldehyde.

5 a) Gesättigte Aldehyde der Fettreihe. Formaldehyd, Methylaldehyd, Methanal $H.C\begin{matrix}\diagup O\\ \diagdown H\end{matrix}$ wurde 1868 von A. W. Hofmann entdeckt und war zunächst nur in Dampfform bekannt. 1892 lernte man durch Kekulé reinen

flüssigen Formaldehyd kennen. Zu seiner Darstellung leitet man Methylalkoholdämpfe mit Luft gemischt über glühende Platin- oder Kupferdrähte. In der Technik verwendet man als Kontaktsubstanzen auch Holzkohle, Graphit, Thonerde oder dgl. (Apparat von Trillat). Bei den sogenannten Formaldehydlampen wird Methylalkohol vergast und der Dampf an einer dünnen vorher zum Glühen gebrachten Platinspirale vorbeistreichen lassen. Hierdurch wird eine konstante kleine Entwicklung von Formaldehyddampf hervorgerufen, der zur Desinfektion dient. Auch Methan, das bei der Holzdestillation gewonnen wird, liefert im Gemisch mit Luft über glühendes Kupfer geleitet Formaldehyd. Ferner entsteht der Aldehyd beim Erwärmen von Methylal $CH_2(OCH_3)_2$ mit Schwefelsäure und von Methylendibromid CH_2Br_2 mit Wasser. Die anderen Aldehyddarstellungsmethoden, insbesondere die Destillation des Calciumformiates ergeben hier nur schlechte Ausbeuten. Doch bilden sich kleine Mengen Formaldehyd bei der unvollständigen Verbrennung der verschiedensten organischen Materialien. Theoretisches Interesse, vielleicht in Zukunft auch praktische Bedeutung, hat die Bildung des Formaldehyds aus Kohlenoxyd und Wasserstoff bei Gegenwart geeigneter Kontaktsubstanzen (Palladium, Platin). Die Reaktion ist umkehrbar

$$H.C\langle^{O}_{H} \rightleftarrows CO + H_2$$

Bei Temperaturen oberhalb 500° ist der Formaldehyddampf fast vollständig in Kohlenoxyd und Wasserstoff gespalten. Formaldehyd wird in großem Maßstabe in der Technik hergestellt. Die Jahresproduktion beträgt ca. 1 Million kg, wovon auf Deutschland etwa die Hälfte fällt.

Der Formaldehyd ist bei gewöhnlicher Temperatur ein Gas, das sich bei starker Abkühlung zu einer wasserhellen Flüssigkeit verdichten läßt, Sdp. —21° d^{-21} 0,8153. Durch stärkere Abkühlung (mittels flüssiger Luft) erstarrt die Flüssigkeit zu festem Formaldehyd, Fp. — 92°. Der flüssige Formaldehyd ist nicht lange haltbar. Beim Siedepunkt verwandelt er sich langsam, bei gewöhnlicher Temperatur sehr rasch in eine polymere feste Modifikation: Trioxymethylen $(CH_2O)_3$. Der Formaldehyd besitzt einen stechenden, durchdringenden Geruch. In reiner Form gewinnt man ihn am besten durch Erhitzen seiner festen Polymeren und Abkühlen des Dampfes (zweckmäßig arbeitet man hierbei im Stickstoffstrom). Im Wasser ist er reichlich löslich (Maximum etwa 55%). Der Formaldehyd des Handels (Formalin, Formol) ist gewöhnlich ein ca. 40% wässerige Lösung des Aldehyds. Kryoskopischen Untersuchungen zufolge enthält die wässerige Lösung monomolekularen und trimeren Aldehyd im Gleichgewicht. Sehr verdünnte Lösungen enthalten fast nur monomolekularen Aldehyd und zwar wahrscheinlich in Hydratform

$$CH_2O + H_2O = CH_2\langle^{OH}_{OH}$$

denn der Partialdruck einer kalten wässerigen Lösung ist nur sehr gering. Auch enthält bei der Destillation das Destillat prozentisch stets weniger Aldehyd als der Rückstand.

Der Formaldehyd ist eine ganz außerordentlich reaktionsfähige Substanz. Einige quantitativ verlaufende Reaktionen werden zur Bestimmung des Aldehyds verwendet. So liefert Wasserstoffsuperoxyd in alkalischer Lösung ameisensaures Natrium und Wasserstoff

$$2\,CH_2O + 2\,NaOH + H_2O_2 = 2\,H.COONa + 2\,H_2O + H_2$$

Durch Zurücktitration der unverbrauchten Natronlauge erfährt man die Menge der gebildeten Ameisensäure. In saurer oder neutraler Lösung bewirken Wasserstoffsuperoxyd und andere Superoxyde Zerfall des Aldehyds in $CO_2 + H_2$. Starke Alkalilauge für sich allein läßt Ameisensäure und Methylalkohol entstehen; schwach alkalische Lösungen dagegen bewirken aldolartige Kondensationen. So bewirkt Calciumcarbonatlösung, Entstehung von Glycolaldehyd

$$2\,CH_2O = CH_2(OH).CHO$$

Kalkwasser, Kalkmilch kondensieren den Formaldehyd zu einem Gemenge zuckerähnlicher Stoffe, Formose genannt, welche, wie Emil Fischer nachwies, Verbindungen von der Zusammensetzung der Zuckerarten $C_6H_{12}O_6$ enthält. Diese sehr interessante und bedeutsame Reaktion ist eine wesentliche Stütze der Theorien über die Assimilation der Kohlensäure durch die Pflanzen. Nach einer Hypothese von Baeyer wird das Kohlendioxyd durch die Pflanzen reduziert zum Formaldehyd und dieser durch den Zellinhalt zu Zuckerarten kondensiert

$$6\,H_2CO = C_6H_{12}O_6$$

Formaldehyd ist ein starkes Reduktionsmittel, das viele Metalle aus ihren Lösungen ausscheidet (Herstellung kolloider Goldlösungen mittels Formaldehyd; Zsigmondy). Silberoxyd und Kupferoxyd bewirken in alkalischer Lösung eine katalytische Zersetzung des Formaldehyds

$$CH_2O + NaOH = H.COONa + H_2$$

Alkalische Jodlösung bewirkt ebenfalls Oxydation des Formaldehyds zu Ameisensäure (quantitative Bestimmung des Formaldehyds durch Titrieren des Jods mit Thiosulfat). Natriumsulfit gibt mit Formaldehyd

die Natriumbisulfit-Verbindung unter Freiwerden von Natronlauge

$$Na_2SO_3 + CH_2O + H_2O = CH_2\langle{}^{OH}_{O.SO_2Na} + NaOH$$

Letztere kann man titrimetrisch messen und den Formaldehyd so bestimmen. Durch Reduktion der Aldehyd-Bisulfit-Verbindung entsteht Formaldehydsulfoxylat

$$CH_2\langle{}^{OH}_{O.SO_2.Na} + H_2 = CH_2\langle{}^{OH}_{O.SONa} + H_2O$$

Die Verbindung entsteht auch aus Natriumhydrosulfit $Na_2S_2O_4$ mit Formaldehyd, kristallisiert prächtig mit 2 Mol Kristallwasser und bildet ein technisch wichtiges Produkt, den sogenannten R o n g a l i t. Eine Doppelverbindung des Rongalit mit Formaldehyd-Natriumbisulfit heißt H y r a l d i t. Rongalit und Hyraldit sind kräftige Reduktionsmittel. Sie wirken aber erst bei höherer Temperatur, während sie bei gewöhnlicher Temperatur ziemlich unempfindlich sind. Dieser Eigenschaft wegen werden sie mit goßem Vorteil in der Kattundruckerei verwendet, weil die für den Aetzdruck notwendige Reduktionswirkung erst bei höherer Temperatur, also erst bei der Operation des Dämpfens zur Geltung kommt, auf diese Weise also die Textilfaser nicht so angegriffen wird.

Mit Ammoniak reagiert der Formaldehyd glatt nach der Gleichung

$$6\ CH_2O + 4\ NH_3 = (CH_2)_6N_4 + 6\ H_2O$$

eine Reaktion, die zur quantitativen Bestimmung des Aldehyds ebenfalls gut verwendet werden kann. Der entstehende Körper, $(CH_2)_6N_4$, dessen Konstitution noch nicht sicher steht, findet medizinische Verwendung unter dem Namen Urotropin oder Formin als harnsäurelösendes Mittel.

Die praktische Verwendung des Formaldehyds ist sehr groß und mannigfaltig. In der Farbstoffindustrie wird er zur Herstellung verschiedener Zwischenprodukte bei der Farbstoffgewinnung benutzt. So gibt Anilin mit dem Aldehyd Diamino-diphenylmethan

$$CH_2O + 2C_6H_5.NH_2 = CH_2(C_6H_4NH_2) + H_2O$$

welches auf Diphenyl- und Triphenylmethanfarbstoffe weiter verarbeitet wird. Weiterhin zeichnet sich der Formaldehyd aus durch die Eigenschaft, Eiweißstoffe (Albumin, Gelatine, Leim) in feste unlösliche Massen zu verwandeln („härten"). In der photographischen Technik findet er deswegen zur Herstellung widerstandsfähiger Films, in der Gerberei zum Härten des Leders Verwendung. Sehr wichtig ist die antiseptische Wirkung des Formaldehyds, welche vermutlich der härtenden Wirkung auf die Eiweißsubstanzen zu verdanken ist. Mikroorganismen werden sehr kräftig in ihrer Entwicklung gehemmt. Die desinfizierende Kraft ist sogar größer als beim Sublimat, und dabei ist doch der Aldehyd für den Menschen nicht sehr giftig. Auch zur Beseitigung von üblen Gerüchen in Zersetzung begriffener Stoffe wird der Aldehyd mit Vorteil benutzt.

P o l y m e r e M o d i f i k a t i o n e n d e s F o r m a l d e h y d s. P a r a f o r m a l d e h y d $(CH_2O)n$ scheidet sich bei der Konzentrierung wässeriger Formaldehydlösungen als weißes amorphes, in Wasser lösliches Pulver aus. M e t a f o r m a l d e h y d (Trioxymethylen, Polyoxymethylen) $(CH_2O)_n$ wird aus Formaldehydlösungen durch wenig Schwefelsäure ausgefällt und ist unlöslich in Alkohol und Aether. Undeutlich kristallinische Masse. Fp. 171°—172°. α-T r i o x y m e t h y l e n $(CH_2O)_3$ bildet sich aus trockenem Metaformaldehyd durch einen Tropfen konzentrierte Schwefelsäure bei ca. 115°. Farblose Nadeln, Fp. 63°, in Wasser, Alkohol und Aether leicht löslich. Die Molargewichtsbestimmung in Dampfform und in Lösung ergibt die Formel $(CH_2O)_3$. Seine Konstitution wird ringförmig angenommen

$$CH_2\langle{}^{O-CH_2}_{O-CH_2}\rangle O$$

Durch Erhitzen oder durch Berührung mit Superoxyden (BaO_2) und Wasser werden die polymeren Formen des Aldehyds wieder entpolymerisiert, worauf ihre technische Verwendung beruht.

A c e t a l d e h y d, Aethylaldehyd, Aethanal, auch „Aldehyd" schlechtweg genannt, $CH_3.CHO$, läßt sich nach den oben geschilderten allgemeinen Darstellungsmethoden herstellen. Gewöhnlich wird er durch Oxydation von Aethylalkohol mittels Kaliumbichromat und Schwefelsäure dargestellt. In erheblichen Mengen findet sich der Aldehyd im Verlauf der Spiritusrektifikation. Zur Reinigung wird der Aldehyd in Aether gelöst und dann Ammoniak eingeleitet, wodurch Aldehydammoniak ausfällt, aus dem man durch verdünnte Schwefelsäure den Aldehyd wieder regenerieren kann.

Der Aldehyd ist eine schon 1774 von S c h e e l e entdeckte Verbindung. Eingehend wurde er durch L i e b i g 1835 charakterisiert.

Der Acetaldehyd ist eine farblose sehr bewegliche Flüssigkeit von eigenartigem intensiven Geruch. Fp. — 120°, Sdp. 20,8°, d^0 0,8009. Er ist in Wasser, Alkohol und Aether löslich. Mol. Verbrennungswärme 275,5 Cal.; Brechungsindex $n^{20}_{\alpha} = 1,330$.

Der Acetaldehyd zeigt die allgemeinen oben angeführten Reaktionen der Aldehyde. Charakteristisch ist die Harzbildung mit Alkalilauge. Die technische Bedeutung des Acetaldehyds im Vergleich zu der des For-

maldehyds ist nur gering. Man verarbeitet ihn auf Paraldehyd und auf Chinaldin, dem Ausgangsmaterial für Chinolingelb.

Polymere Modifikationen des Acetaldehyds. Der Aldehyd polymerisiert sich außerordentlich leicht, und zwar wirken Spuren von Verunreinigungen oft stark katalysierend auf die Polymerisationsprozesse ein, so daß es nur selten gelingt, Aldehyd in reinem Zustand aufzubewahren. Paraldehyd $(CH_3CHO)_3$ entsteht aus dem Aldehyd bei gewöhnlicher Temperatur durch geringe Mengen verschiedener Agentien (HCl, $ZnCl_2$, SO_2, $(CN)_2$ u. a.), besonders leicht durch einen Tropfen konzentrierte Schwefelsäure. Paraldehyd ist eine wasserhelle angenehm riechende Flüssigkeit, Fp. + 12,5° Sdp. 124°, d^{20} 0,9943. In Wasser ist er etwas löslich: 100 Vol. H_2O lösen 12 Vol. Paraldehyd bei 13°; in kaltem Wasser ist die Löslichkeit größer als in heißem, was auf die Existenz eines Hydrats deutet. Dampfdichtebestimmung und kryoskopische Messungen ergaben dreifache Molekularformel des Acetaldehyds. Die gewöhnlichen Aldehydreaktionen (Silberspiegelbildung, Vereinigung mit Ammoniak oder Alkalibisulfit, Phenylhydrazonbildung) zeigt der Paraldehyd nicht. Man darf deshalb annehmen, daß er die Gruppe

$$C\begin{matrix}\nearrow O\\ \searrow H\end{matrix}$$

nicht enthält, und seine Konstitution ringförmig ist

$$CH_3.CH\begin{matrix}\diagup O - CH\begin{matrix}\diagup CH_3\\ \diagdown O\end{matrix}\\ \diagdown O - CH\begin{matrix}\diagup \\ \diagdown CH_3\end{matrix}\end{matrix}$$

Durch Destillation mit etwas Schwefelsäure wird er wieder zum Acetaldehyd entpolymerisiert. Der Paraldehyd wird in der Medizin als Schlafmittel verwendet. Metaldehyd $(CH_3.CHO)_3$ bildet sich mit Hilfe derselben Agentien wie der Paraldehyd aus dem Acetaldehyd nur bei niederer Temperatur (unter 0°), und bildet eine weiße kristallinische Substanz, die bei etwa 115° sublimiert unter teilweiser Zersetzung in gewöhnlichen Aldehyd. In Wasser ist der Metaldehyd unlöslich, seine übrigen Eigenschaften und Reaktionen sind denen des Paraldehyds sehr ähnlich.

Die höheren Homologen der Aldehyde in der Methanreihe haben nur zum Teil spezielleres Interesse. Die Aldehyde von 7 und mehr Kohlenstoffatomen zeichnen sich durch schönen blumenartigen Geruch aus und finden deshalb Verwendung zur Herstellung künstlicher Riechstoffe. Einige Aldehyde finden sich auch in den ätherischen Oelen verschiedener Pflanzen

Propionaldehyd $C_2H_5.CHO$, Sdp. 49°, d^{20} 0,807

n-Butyraldehyd $C_3H_7.CHO$ Sdp. 75°, d^{20} 0,817

Isobutyraldehyd $\begin{matrix}CH_3\\ CH_3\end{matrix}\!\!>\!CH.CHO$ Sdp. 63°, d^{20} 0,794

n-Valeraldehyd $C_4H_9.CHO$ Sdp. 103°

Iso-valeraldehyd $\begin{matrix}CH_3\\ CH_3\end{matrix}\!\!>\!CH.CH_2.CHO$ Sdp. 92°, d^{20} 0.798

Trimethylacetaldehyd $(CH_3)_3.C.CHO$, Fp + 3°, Sdp. 74°, d^{18} 0,793

n-Capronaldehyd $C_5H_{11}.CHO$, Sdp. 128°, d^{20} 0.834

n-Oenanthaldehyd Oenanthol $C_6H_{13}.CHO$, Sdp. 155°, d^{20} 0,850 ist verhältnismäßig leicht zugänglich, da er aus Ricinusölsäure $C_{18}H_{34}O_3$ durch Destillation unter vermindertem Druck neben Undecylensäure $C_{11}H_{20}O_2$ entsteht

$$CH_3(CH_2)_5.CHOH.CH_2.CH: CH.(CH_2)_7.COOH = C_6H_{13}.CHO + CH_2: CH.(CH_2)_8.COOH$$

n-Caprylaldehyd $C_7H_{15}.CHO$, $Sdp._{32}$ 81°, d^{15} 0.827 findet sich im Citronenöl

n-Pelargonaldehyd $C_8H_{17}.CHO$ $Sdp._{13}$ 80°—82°, d^{15} 0,828. Findet sich im deutschen Rosenöl, Citronenöl, Mandarinenöl, Ceylonzimmtöl.

n-Caprinaldehyd $C_9H_{19}.CHO$, $Sdp._{12}$ 93°—94°, d^{15} 0.828. Findet sich im Pomeranzenschalenöl, Lemongrasöl.

Undecanal $C_{10}H_{21}.CHO$, Fp. — 4°, Sdp_{18} 116—117, d^{23} 0,825.

Laurinaldehyd $C_{11}H_{23}.CHO$, Fp. 44,5 °, $Sdp._{24}$ 147°, d 0,8388. Findet sich im Edeltannenöl.

Tridecanal $C_{12}H_{25}.CHO$, Fp. 14°, $Sdp._{21}$ 152°.

Myristinaldehyd $C_{13}H_{27}.CHO$, Fp. 52,5°, $Sdp._{24}$ 166°.

Pentadecanal $C_{14}H_{29}.CHO$, Fp. 24°—25°, $Sdp._{25}$ 185°.

Palmitinaldehyd $C_{15}H_{31}.CHO$, Fp. 58,5°, $Sdp._{22}$ 192°.

Margarinaldehyd $C_{16}H_{33}.CHO$, Fp. 36°, $Sdp._{26}$ 204°.

Stearinaldehyd $C_{17}H_{35}.CHO$, Fp 63,5°, $Sdp._{22}$ 212°.

Chloral, Trichloracetaldehyd $CCl_3.CHO$, von Liebig entdeckt, wird hergestellt durch Einwirkung von Chlor auf Alkohol, wobei das Halogen gleichzeitig substituierend und oxydierend wirkt. Chloral ist eine scharf riechende ölige Flüssigkeit, welche sich leicht polymerisiert. Sdp. 97°, d^0 1.541. Das Chloral zeigt die typischen Aldehydreaktionen, besonders aber große Additionsfähigkeit. Durch Vereinigung mit Wasser entsteht das

Chloralhydrat $CCl_3.HC\begin{matrix}\diagup OH\\ \diagdown OH\end{matrix}$, große

monokline Kristalle, Fp. 57°, Sdp. 96° bis 98°, in Wasser leicht löslich. Es findet medizinische Verwendung als Schlafmittel und wird zu diesem Zwecke technisch in großem Maßstabe fabriziert. Chloral und sein Hydrat werden durch Alkali in Chloroform und ameisensaures Salz gespalten

$$CCl_3.CHO + KOH = H.CCl_3 + H.COOK$$

Durch Oxydation mit Salpetersäure entsteht Trichloressigsäure.

Bromal. $CB_3.CHO$, Sdp. 172°—173° und Bromalhydrat $CBr_3.CH(OH)_2$ Fp. 53° sind dem Chloral und Chloralhydrat ganz analoge Verbindungen.

5b) Ungesättigte Aldehyde der Fettreihe. Die ungesättigten Aldehyde können nach den meisten allgemeinen Aldehyd-Darstellungsmethoden erhalten werden. An speziellen Bildungsweisen sind zu nennen ihre Entstehung:

1. Durch Wasserentziehung aus den Aldolen, welche aus den gesättigten Aldehyden durch Kondensation hervorgehen

$$2\,CH_3.CHO \longrightarrow CH_3.CH(OH) - CH_2.CHO \longrightarrow CH_3.CH = CH.CHO.$$

Crotonaldehyd

2. Aus Glycerin und substituierten Glycerinen durch Wasserabspaltung

$$CH_2(OH).CH(OH).CH_2(OH) = CH_2 : CH.CHO + 2\,H_2O.$$

Acroleïn

Weitaus die meisten bekannten ungesättigten Aldehyde sind α-β-Olefinaldehyde, d. h. die Doppelbindung befindet sich zwischen dem ersten und zweiten Nachbarkohlenstoffatom der CO-Gruppe. Die ungesättigten Aldehyde zeigen dieselben Reaktionen wie die Grenzaldehyde. Außerdem verleiht die Doppelbindung ihnen noch die Additionsfähigkeit ungesättigter Kohlenwasserstoffe, die aber häufig, wenn die CO-Gruppe in der Nähe steht, noch besonders gesteigert ist.

Acroleïn $CH_2 : CH.CHO$ bildet sich durch Oxydation des Allylalkohols und durch Erhitzen von Glycerin mit Kaliumbisulfat, Phosphorsäure oder Borsäure. Glycerinhaltige Substanzen wie Fette und fette Oele lassen beim Erhitzen kleine Mengen des Aldehyds entstehen, wovon auch der scharfe Geruch der Dämpfe dieser Substanzen herrührt. Acrolein ist eine wasserhelle, bewegliche Flüssigkeit, von unerträglichem Geruch, besonders die Augen stark angreifend. Sdp. 52,4°, d^{20} 0,8410. In Wasser ist es ziemlich löslich, in reinem Zustande aber kaum haltbar, da es sich außerordentlich leicht polymerisiert. Die Additionsfähigkeit ist sehr groß und kann sich an der CO-Gruppe oder an der Doppelbindung betätigen; häufig wirkt sie an beiden Stellen gleichzeitig. So bildet sich mit Natriumbisulfit die Verbindung

$$CH_2(SO_3Na).CH_2.CH\begin{matrix}\diagup OH \\ \diagdown SO_3Na\end{matrix}$$

Mit Hydrazin oder Phenylhydrazin bildet sich Pyrazolin, oder 1-Phenylpyrazolin

$$\begin{matrix} CH - CHO \\ \| \\ CH_2 \end{matrix} + \begin{matrix} NH_2 \\ | \\ NH_2 \end{matrix} = \begin{matrix} CH - CH = N \\ \| \qquad\qquad | \\ CH \text{———} NH \end{matrix}$$

Hydrazin Pyrazolin

Ammoniak gibt mit Acroleïn Acroleïnammoniak

$$2\,CH_2{:}CH.CHO + NH_3 = C_6H_9NO + H_2O$$

eine amorphe Masse, welche beim Destillieren Wasser abspaltet und in Picolin, eine Base der Pyridinreihe, übergeht

$$C_6H_9NO = C_6H_7N + H_2O.$$

Polymere des Acroleïns sind: Disacryl, eine weiße amorphe Substanz. Metacroleïn $(C_3H_4O)_3$ entsteht aus der Verbindung von Acroleïn mit HCl durch Behandeln mit Kali. Lange farblose Nadeln, Fp. 45°, die durch Mineralsäuren leicht wieder entpolymerisiert werden.

Crotonaldehyd $CH_3.CH{:}CH.CHO$, entsteht aus Aldol durch Wasserabspaltung (Kekulé). Stechend riechende, in Wasser ziemlich lösliche Flüssigkeit. Sdp. 104° $d^{1}_{4}{}^{4}$ 0,8593. Durch Stehen mit verdünnter HCl wird sie zu Aldol hydratisiert. Der Crotonaldehydammoniak liefert beim Destillieren Collidin.

Tiglinaldehyd, Guajol $CH_3.CH{:}C(CH)_3.CHO$ entsteht durch Kondensation von Acetaldehyd mit Propionaldehyd, und findet sich auch in den Destillationsprodukten des Guajak-Harzes. Sdp. 118°, d^{15} 0.871.

Zu den höheren Homologen der Olefinaldehyde gehören das Citronellal

$$\begin{matrix} CH_3 \diagdown \\ CH_3 \diagup \end{matrix} C.CH_2.CH_2.CH_2CH(CH_3).CH_2.CHO$$

Sdp. 205°—206°, d^{20} 0.855 n^{D}_{20} 1.448, das Rhodinal

$$(CH_3)_2C{:}CH{-}CH_2.CH_2.CH(CH_3).CH_2.CHO$$

und das Citral (Geranial)

$$(CH_3)_2.C{:}CH.CH_2.CH_2.C(CH_3){:}CH.CHO$$

Sdp. 224—226°, d^{20} 0.8844, n^{15}_{D} 1.4931. Sie kommen in vielen ätherischen Oelen vor und gehören nach ihren ganzen Eigenschaften zu den (olefinischen) Terpenen. Sie werden deshalb bei den „Terpenen“ gesondert abgehandelt.

Propiolaldehyd, Propargylaldehyd, $CH \equiv C.CHO$, entsteht aus Acroleïnacetal durch Bromierung und darauf folgende Behandlung mit alkoholischem Kali.

$$CH_2{:}CH.CHO \longrightarrow$$
Acroleïn

$$CH_2{:}CH.CH\left\langle\begin{matrix}OC_2H_5\\OC_2H_5\end{matrix}\right. \longrightarrow CH_2Br.CHBr$$

$$.CH\left\langle\begin{matrix}OC_2H_5\\OC_2H_5\end{matrix}\right. \longrightarrow CH \equiv C.CH\left\langle\begin{matrix}OC_2H_5\\OC_2H_5\end{matrix}\right.$$

$$\longrightarrow CH \equiv C.CHO$$

Bewegliche, in Wa ser leicht lösliche Flüssigkeit, welche Augen und Nasenschleimhaut sehr heftig reizt. Sdp. 59°. Gibt wie alle Acetylenverbindungen explosive Kupfer- und Silbersalze und ist außerordentlich additionsfähig. Es entsteht z. B. mit Hydrazin Pyrazol

$$\begin{matrix}C.CHO\\ \|\!\|\\ CH\end{matrix} + \begin{matrix}H_2N\\ |\\ H_2N\end{matrix} = H_2O + \begin{matrix}CH.CH.N\\ \|\quad\quad |\\ CH\text{——}NH\end{matrix}$$

Pyrazol.

5c) Dialdehyde.

Glyoxal, Oxalaldehyd, Aethandial CHO. CHO, entsteht neben anderen Produkten bei der Oxydation von Aethylalkohol oder Aethylenglycol mit Salpetersäure; ferner bei der Spaltung von α-β-Olefinaldehyden mit Ozon. Goldgelbe Kristalle, Fp. 15°, Sdp. 51°,d^{20} 1,14. Die Substanz löst sich in wasserfreien Lösungsmitteln mit gelber Farbe (charakteristisch für Substanzen mit CO-CO-Gruppe), in Wasser farblos. Beim Eindampfen der wässerigen Lösung wird ein weißes, amorphes Pulver erhalten, welches ein Polymeres des Aldehyds darstellt $(CHO.CHO)_n$. Durch Oxydation geht das Glyoxal in Oxalsäure, durch Reduktion in Glycol über. Durch Einwirkung von Alkali entsteht (schon bei gewöhnlicher Temperatur) Glycolsäure, wobei die eine COH-Gruppe oxydiert, die andere reduziert wird. $CHO.CHO + KOH = CH_2OH.COOK$

Succindialdehyd, Butandial. $COH.CH_2.CH_2.CHO$ entsteht durch Wasseraddition an Furfuran, wobei als Zwischenprodukt wahrscheinlich ein unbeständiges ungesättigtes Glycol anzunehmen ist

$$\begin{matrix}CH=CH\\ |\\ CH=CH\end{matrix}\!\!\!>O + H_2O = \begin{matrix}CH=CH(OH)\\ |\\ CH=CH(OH)\end{matrix} \longrightarrow$$

$$\begin{matrix}CH_2-CHO\\ |\\ CH_2-CHO\end{matrix}$$

Am besten wird der Aldehyd erhalten durch Spaltung des aus Pyrrol erhaltenen Dioxims. $Sdp._{10}$ 67°. Durch Erhitzen mit Wasser entsteht aus dem Dialdehyd Furfuran, mit Ammoniak Pyrrol, mit Phosphortrisulfid Thiophen.

5d) Oxyaldehyde. Die Oxyaldehyde besitzen ein besonderes Interesse, da eine Reihe von Stoffen, die die Natur in großem Maßstab im Pflanzenorganismus produziert, zu ihnen gehört, nämlich die sogenannten Kohlehydrate (Traubenzucker, Fruchtzucker, Rohrzucker, Stärke, Cellulose u. a.). Sie bilden eine Klasse für sich und werden daher gesondert abgehandelt (vgl. den Artikel „Kohlehydrate"). Hier seien nur einige einfache Glieder der Reihe erwähnt.

Glycolaldehyd, Aethanolal $CH_2(OH).CHO$ läßt sich darstellen durch Erwärmen von Dioxymaleinsäure mit Wasser auf 50°—60°

$$\begin{matrix}C(OH)-COOH\\ \|\\ C(OH)-COOH\end{matrix} = \begin{matrix}CH_2OH\\ |\\ CHO\end{matrix} + 2CO_2.$$

In geringer Menge wird er durch Kondensation von Formaldehyd mittels Calciumcarbonat erhalten. Die Substanz ist in Wasser leicht löslich und schmeckt schwach süß. Fp. 95°—98°. Durch verdünnte Natronlauge wird sie zu Tetrose $CH_2OH.CHOH.CHOH.CHO$, durch Sodalösung z. T. zu Acrose $CH_2OH(CHOH)_3CO.CH_2OH$ kondensiert.

Aldol, β-Oxybutyraldehyd $CH_3.CH(OH).CH_2.CHO$ bildet sich aus Acetaldehyd durch Kondensation (Würtz, s. o.). Aldol ist eine farblose geruchlose in Wasser lösliche Flüssigkeit. $Sdp._{16}$ 77°, d^0 1,121. Beim Erhitzen auf höhere Temperatur zerfällt es in Wasser und Crotonaldehyd. Bei längerem Stehen polymerisiert sich das Aldol zu Paraldol $(C_4H_8O_2)_2$.

Glycerinaldehyd, Propandiolal $CH_2OHCHOH.CHO$ entsteht aus Acroleinacetal durch Oxydation mit Permanganat und darauf folgende Verseifung

$$CH{:}CH.CH\left\langle\begin{matrix}OC_2H_5\\OC_2H_5\end{matrix}\right. \xrightarrow{+O+H_2O}$$

$$CH_2OH.CH(OH).CH\left\langle\begin{matrix}OC_2H_5\\OC_2H_5\end{matrix}\right. \longrightarrow$$

$$CH_2OH.CHOH.CHO$$

Nadeln, Fp. 138°, welche süß schmecken, in Wasser gut löslich, in Alkohol und Äther schwer löslich sind und Fehlingsche Lösung reduzieren. Ein Gemisch von Glycerinaldehyd und Dioxyaceton $CH_2OH.CO.CH_2OH$, in welchem letzteres vorwaltet, wird durch gelinde Oxydation von Glycerin mit verdünnter Salpetersäure, Brom oder Wasserstoffsuperoxyd bei Gegenwart von Ferrosalz erhalten und „Glycerose" genannt. Durch Natronlauge entsteht aus ihr Acrose.

5e) Aromatische Aldehyde. Die aromatischen Aldehyde entstehen nach den oben angeführten Bildungsweisen. Außerdem lassen sie sich darstellen 1. durch Oxydation des zugehörigen Kohlenwasserstoffs durch Chromylchlorid CrO_2Cl_2 (Etardsche Reaktion); 2. durch Einwirkung von Kohlenoxyd

und Chlorwasserstoff auf die Benzol-Kohlenwasserstoffe bei Gegenwart von Kupferchlorür und Aluminiumchlorid oder -bromid (Gattermann). Die Reaktion ist ein Spezialfall der Friedel-Craftschen Synthese, denn das Gemisch von CO + HCl verhält sich wie das Chlorid der Ameisensäure $H.CO.Cl C_6H_6 + H.CO.Cl = C_6H_5.CHO + HCl$ Bei Phenoläthern versagt die Reaktion, sie gelingt jedoch, wenn man statt CO Blausäure anwendet. Es entstehen Alkyloxyaldehydimide $C_6H_4\langle{}^{OR}_{HC:NH}$ die durch Behandeln mit Mineralsäuren leicht in die Aldehyde übergehen; 3. durch Umsetzung von Dihalogenverbindungen mit Wasser und ebenso auch von Monohalogenverbindungen. In diesem Falle müssen aber Oxydationsmittel zugegen sein (Bleinitrat, Kupfernitrat); 4. Aus den leicht zugänglichen aromatischen α - Ketonsäuren $R.C_6H_4.CO.COOH$, welche durch Erhitzen mit Anilin leicht die Anile der Aldehyde geben

$$C_6H_5.NH_2 + R.C_6H_4.CO.COOH = R.C_6H_4.CH:NC_6H_5 + CO_2$$

Die Anile sind wieder leicht spaltbar.

Die aromatischen Aldehyde zeigen im allgemeinen dieselben Eigenschaften wie die aliphatischen, nur sind sie ziemlich viel beständiger. Sie polymerisieren sich nicht wie die Anfangsglieder der Fettreihe. Alkali erzeugt aus ihnen den zugehörigen Alkohol und die zugehörige Säure (Cannizzoro). Nascierender Wasserstoff reduziert zu den Alkoholen. Gleichzeitig treten dabei zwei Aldehydreste zusammen unter Bildung von sogenannten Hydrobenzoïnen

$$2C_6H_5.CHO + H_2 = C_6H_5.CHOH.CHOH.C_6H_5$$

Alkoholische Cyankaliumlösung bewirkt Kondensation zu Ketonalkoholen, sogenannten Benzoïnen (Zincke)

$$2\,C_6H_5.CHO = \underset{\text{Benzoin}}{C_6H_5.CH(OH).CO.C_6H_5}$$

Ammoniak addiert sich nicht in der Weise wie bei den aliphatischen Aldehyden. Es entstehen vielmehr unter Wasseraustritt sogenannte Hydramide

$$3\,C_6H_5.CHO + 2\,NH_3 = \begin{matrix} C_6H_5.CH=N \\ C_6H_5.CH=N \end{matrix}\rangle CH.C_6H_5$$

Mit Anilinen entstehen sogenannte Schiffsche Basen $C_6H_5.CH:N.C_6H_5$, je nach den Bedingungen aber auch Triphenylmethanderivate

$$C_6H_5.CH\langle\begin{matrix} C_6H_4NH_2 \\ C_6H_4NH_2 \end{matrix}$$

Aldolkondensationen treten bei den aromatischen Aldehyden sehr leicht ein. Nur wird gewöhnlich Wasser abgespalten und es entstehen ungesättigte Verbindungen. So entstehen

$$C_6H_5.CHO + \underset{\text{Acetaldehyd}}{CH_3.CHO} = \underset{\text{Zimmtaldehyd}}{C_6H_5.CH.CH:CHO} + H_2O$$

$$C_6H_5.CHO + \underset{\text{Essigsäure}}{CH_3.COOH} = \underset{\text{Zimmtsäure}}{C_6H_5.CH:CH.COOH} + H_2O$$

(Perkinsche Zimmtsäure-Synthese)

$$C_6H_5.CHO + \underset{\text{Acetophenon}}{CH_3.CO.C_6H_5} = \underset{\text{Benzalacetophenon}}{C_6H_5.CH:CH.CO.C_6H_5}$$

Benzaldehyd, Bittermandelöl $C_6H_5.CHO$, kommt in den bitteren Mandeln und auch in den Kernen mancher Früchte (Kirschen, Pfirsiche, Aprikosen) als Glycosid Amygdalin vor. Das Amygdalin $C_{20}H_{27}NO_{11}$ wird durch Kochen mit verdünnten Säuren oder durch Einwirkung eines in den bitteren Mandeln enthaltenen Enzyms (Emulsin) in Glucose, Bittermandelöl und Blausäure zerlegt (Liebig und Wöhler 1831). Technisch wird der Benzaldehyd hergestellt aus Toluol, welches durch Chlorieren in Benzalchlorid $C_6H_5.CHCl_2$ verwandelt wird. Dieses wird durch Kochen mit Kalkmilch in den Aldehyd übergeführt. Auch durch Oxydation von Benzylchlorid $C_6H_5.CH_2Cl$ mit Bleinitrat wird Bittermandelöl erzeugt. Der Benzaldehyd ist von allen Aldehyden am leichtesten in reinem Zustande zugänglich und infolge seiner großen Reaktionsfähigkeit ein außerordentlich viel gebrauchtes Reagens. Technischen Benzaldehyd kann man sehr oft von natürlichem Bittermandelöl dadurch unterscheiden, daß er von der Darstellung her (allerdings nicht immer) noch etwas Chlor enthält.

Benzaldehyd ist eine farblose, stark lichtbrechende, nach bitteren Mandeln riechende, ölige Flüssigkeit, welche in Wasser nur wenig löslich ist. Fp. —13,5°, Sdp. 180°, d^{15} 1,050, $n^{20}_{H\gamma}$ 1,57749.

Benzaldehyd oxydiert sich an der Luft allmählich zu Benzoësäure, wobei als Zwischenprodukte wahrscheinlich superoxydähnliche Gebilde auftreten. Die chemischen Eigenschaften sind oben schon angeführt. In der Technik wird das Bittermandelöl zur Herstellung verschiedener Farbstoffe (Malachitgrün), zur Zimmtsäuredarstellung und auch in der Parfümerie verwendet. Das Phenylhydrazon schmilzt bei 155°, das Semicarbazon bei 214°.

o-Toluylaldehyd $CH_3.C_6H_4.CHO$, Sdp. 199°.

m-Toluylaldehyd $CH_3.C_6H_4.CHO$, Sdp. 199°, d^0 1,037.

p-Toluylaldehyd $CH_3.C_6H_4.CHO$, Sdp. 204°, riecht pfefferartig.
Phenylacetaldehyd $C_6H_5.CH_2.CHO$, Sdp. 206°, d 1,085.
Hydrozimmtaldehyd $C_6H_5.CH_2.CH_2.CHO$, Sdp. 223°—224°.
3,5-Dimethylbenzaldehyd $(CH_3)_2.C_6H_3.CHO$, Sdp. 221°.
Cuminol, p-Isopropylbenzaldehyd $(CH_3)_2CH.C_6H_4.CHO$, kommt in Römisch-Kümmelöl vor und riecht nach Kümmel. Sdp. 235°, d^{13} 0,973.
o-Nitrobenzaldehyd $NO_2.C_6H_4.CHO$, Fp. 46°, wird durch Belichtung in o-Nitrosobenzoësäure umgelagert. Behandelt man den Aldehyd mit Aceton und Natronlauge, entsteht Indigo

$$2C_6H_4\left\langle\begin{matrix}HO_2\\CHO\end{matrix}\right. + 2CH_3.CO.CH_3 =$$

$$2C_6H_4\left\langle\begin{matrix}NO_2\\CH\!\left\langle\begin{matrix}OH\\ \end{matrix}\right.\!-CH_2.CO.CH_3\end{matrix}\right. =$$

$$C_6H_4\left\langle\begin{matrix}NH\\CO\end{matrix}\right\rangle C:C\left\langle\begin{matrix}NH\\CO\end{matrix}\right\rangle C_6H_4 +$$

Indigo

$$2CH_3.COOH + 2H_2O.$$

o-Amidobenzaldehyd $NH_2.C_6H_4.CHO$, Fp. 39°, kondensiert sich bei Gegenwart verdünnter NaOH mit Acetaldehyd und dessen Derivaten zu Chinolin bzw. Chinolinabkömmlingen

$$C_6H_4\left\langle\begin{matrix}NH_2\\CHO\end{matrix}\right. + \begin{matrix}CHO\\|\\CH_3\end{matrix} = C_6H_4\left\langle\begin{matrix}N=CH\\|\\HC=CH\end{matrix}\right.$$

Chinolin

p-Amidobenzaldehyd $NH_2.C_6H_4.CHO$, Fp. 70°.
Terephtalaldehyd $C_6H_4(CHO)_2$, Fp. 116°, Sdp. 245—248°.
Zimmtaldehyd, β-Phenylacroleïn $C_6H_5.CH:CH.CHO$ ist der Hauptbestand teil (75—80%) des Zimmtöls (Cassiaöls) und wird synthetisch durch Kondensation von Benzaldehyd mit Acetaldehyd mittels verdünnter Natronlauge gewonnen. Aromatisches mit Wasserdampf flüchtiges, stark lichtbrechendes Oel, Sdp. 247°, d^{20} 1,050, n_D^{20} 1,6195. Der Aldehyd findet Verwendung in der Parfümerie, Likör- und Gewürzextraktfabrikation.

Oxyaldehyde. Die aromatischen Oxyaldehyde, zu denen mehrere technisch wertvolle Substanzen zählen, besitzen einige besondere Bildungsweisen. Sie entstehen 1. durch Einwirkung von Chloroform auf Phenole bei Gegenwart von überschüssigem Alkali (Reimer-Tiemannsche Synthese)

$$C_6H_5.OK + HCCl_3 + 3\,KOH =$$
$$C_6H_4.(OK)CHO + 3\,KCl + 2\,H_2O$$

Die Aldehydgruppe tritt in Ortho- oder Parastellung ein; 2. durch Oxydation ungesättigter Phenoläther. Es bilden sich so Aether der Oxyaldehyde

$$CH_3.O.C_6H_4.CH.CH.CH_3$$
$$\longrightarrow CH_3.O.C_6H_4.CHO$$

3. nach der Gattermannschen Aldehydsynthese durch die Einwirkung von wasserfreier Blausäure anstatt Kohlenoxyd auf Phenoläther bei Gegenwart von Kupferchlorür und Aluminiumchlorid (s. o.). Die Oxyaldehyde zeigen neben dem Aldehydcharakter noch die Eigenschaften von Phenolen, indem sie zur Bildung von Salzen und von Aethern befähigt sind.

Salicylaldehyd, o-Oxybenzaldehyd $(OH).C_6H_4.CHO$, findet sich im flüchtigen Oel von Spiräarten. Er entsteht durch Oxydation von Saligenin (o-Oxybenzylalkohol), welches aus dem Glycosid Salicin durch Emulsin, Ptyalin oder verdünnte Säuren erhalten wird. Am besten wird er aus Phenol mittels Chloroform und Alkali dargestellt (s. o.). Angenehm riechendes Oel, in Wasser ziemlich löslich und mit Wasserdampf flüchtig. Fp. —20°, Sdp. 196,5°, d^{15} 1,172. Die wässerige Lösung wird durch Eisenchlorid intensiv violett gefärbt. Alkalicarbonate werden durch den Aldehyd zersetzt, dagegen Fehlingsche Lösung nicht reduziert. Die Haut wird durch den Salicylaldehyd gelb gefärbt.
m-Oxybenzaldehyd $(OH)C_6H_4.CHO$, Fp. 104°, Sdp. 240°.
p-Oxybenzaldehyd $(OH)C_6H_4.CHO$, Fp. 116°, löst sich beträchtlich in kaltem Wasser und riecht schwach aromatisch.
Anisaldehyd, p-Methoxybenzaldehyd $CH_3O.C_6H_4.CHO$, wird durch Oxydation des Anethols $CH_3.O.C_6H_4.CH:CH.CH_3$, dem Hauptbestandteil des Anisöls, gewonnen. Wie blühender Weißdorn riechendes Oel. Fp. —4°, Sdp. 245°—246°, d^{15} 1,126. Der Aldehyd ist im Handel unter dem Namen „Aubépine" bekannt und wird zu Parfümeriezwecken verwendet.
Protocatechualdehyd, 3,4 Dioxybenzaldehyd HO — ⟨benzene ring⟩ — CHO, (with HO in 3-position), Fp. 153° bis 154°, in Wasser ziemlich löslich, gibt mit Eisenchlorid Grünfärbung.
Vanillin, 3-Methoxy-4-oxybenzaldehyd HO — ⟨benzene ring⟩ — CHO (with CH_3O in 3-position), ist der für den Geschmack und den Geruch wirksame Bestandteil der Vanilleschoten und scheidet sich bei ihnen an der Außenfläche oft in kleinen weißen glänzenden Nädelchen ab. Gute Vanillesorten

enthalten 1,5—2,75% Vanillin. Der Aldehyd wird technisch hergestellt durch Oxydation von Isoeugenol, das wiederum aus Eugenol durch Einwirkung von alkoholischem Kali gewonnen wird

$$(HO)(CH_3O)C_6H_3.CH_2.CH{:}CH_2$$
Eugenol
$$\longrightarrow (HO)(CH_3O)C_6H_3.CH{:}\,CH.CH_3$$
Isoeugenol
$$\longrightarrow (HO)(CH_3O)C_6H_3.CHO.$$
Vanillin

Vanillin bildet weiße Nadeln, Fp. 80°—81°, die intensiv nach Vanille riechen und schmecken und in Wasser wenig löslich sind. Die wässerige Lösung wird durch Eisenchlorid schwach violett gefärbt. Beim Kochen dieser Lösung scheidet sich Dehydrodivanillin in weißen Nadeln ab. Durch Erhitzen des Vanillins mit verdünnter Salzsäure auf 200° wird Protocatechualdehyd gebildet. Das Vanillin wird in der Parfümerie, in der Konditorei und Schokoladenfabrikation als Ersatz für Vanille verwendet und hat letztere fast vollständig verdrängt.

Piperonal, Heliotropin, Protocatechualdehydmethylenäther

$$O - C_6H_3 - CHO, \quad CH_2-O \text{ (Ring)}$$

kommt im Heliotrop und in den Vanilleschoten vor. Es entsteht durch Oxydation von Piperinsäure $CH_2\langle{}^{O}_{O}\rangle C_6H_3.CH{:}\,CH.CH{:}CH.COOH$. Technisch wird es hergestellt durch Oxydation des Safrols (aus Kampferöl) $CH_2\langle{}^{O}_{O}\rangle C_6H_5.CH_2.CH{:}CH_2$, bezw. Isosafrols. Piperonal kristallisiert aus Wasser in großen, glänzend weißen Kristallen, Fp. 37°, Sdp. 263°, welche angenehm nach den Blüten des Heliotrops riechen. Beim Erhitzen mit verdünnter Salzsäure bildet sich Protocatechualdehyd. Piperonal wird in dei Parfümerie und in dei Seifenfabrikation verwendet zur Erzeugung des Heliotropgeruchs.

5f) Heterozyklische Aldehyde.

Furfurol, Furol $\begin{matrix} CH = C\langle^{CHO}_{O} \\ | \quad\quad / \\ CH = CH \end{matrix}$ entsteht, durch Destillation von Kleie (Furfur), Zucker, Holz und vieler Kohlehydrate mit verdünnter Schwefelsäure. Quantitativ verläuft der Prozeß beim Erhitzen der Pentosen mit verdünnter HCl, und dient zur Bestimmung dieser Substanzen

$$CH_2OH.(CHOH)_3.CHO = 3\ H_2O + C_5H_4O_3$$
Furfurol

Furfurol ist eine aromatisch riechende farblose Flüssigkeit, die sich bald an der Luft dunkel färbt. Sdp. 162°, $d\,^{20}_{4}$ 1,1594. Der Aldehyd zeigt in seinen chemischen Eigenschaften die größte Ähnlichkeit mit Benzaldehyd und gibt ganz analoge Derivate. Er kann in kleinen Mengen nachgewiesen werden durch Anilin oder Xylidin, mit denen er eine charakteristische Rotfärbung erzeugt. Durch Oxydation entsteht aus dem Furfurol die Brenzschleimsäure (α-Furfurancarbonsäure) $C_4H_3O.COOH$, durch Reduktion Furfuralkohol $C_4H_3O.CH_2OH$.

α-Methylfurfurol $\begin{matrix} CH = C\langle^{CHO}_{O} \\ | \\ CH = C\langle^{O}_{CH_3} \end{matrix}$

Sdp. 184°—186° entsteht durch Destillation der Rhamnose mit verdünnter Schwefelsäure.

Literatur. *F. Beilstein, Handbuch der organischen Chemie, Hamburg und Leipzig 1893 bis 1906. — J. E. Orloff, Formaldehyd, Leipzig 1909. — L. Bouveault, Bull. soc. chin. [3] 31, 1306 (1904).*

G. Reddelien.

Aldrovandi
Ulisse.

Geboren am 11. September 1522 in Bologna; gestorben am 1. April 1605 daselbst. Er war zuerst Jurist, wandte sich dann aber medizinischen und philosophischen Studien zu. Er fiel 1549 in den Verdacht, ein Häretiker zu sein, und wurde in Rom gefangen gesetzt. Seit dem Tode des Papstes Paul III. wieder frei geworden, widmete er sich nun in Rom der Naturwissenschaft und begann mit großem Talent und Fleiß Pflanzen und Fische zu sammeln. 1568 siedelte er wieder nach Bologna über, um dem dort neu gegründeten Botanischen Garten bis fast an sein Lebensende vorzustehen. Erst in seinem 72. Lebensjahre begann er die Herausgabe seiner umfassenden zoologischen Werke, von denen er jedoch selbst nur noch die Vögel, Insekten und die niederen Tiere herausgeben konnte. Die übrigen Bände gaben Uterverinus, Dempster und Bartholomaeus Ambrosinus heraus. Die Arbeiten Aldrovandis zeichnen sich besonders dadurch aus, daß sie ein für damalige Zeit großes Material umfaßten, das einer gewissen systematischen Durcharbeitung, und einer wenn auch nur beschränkten Berücksichtigung der Anatomie, nicht entbehrt. Mit einem außerordentlichen Apparat von Gelehrsamkeit sucht er alles Wissenswerte über jedes einzelne Tier zusammenzutragen, wodurch allerdings die Uebersichtlichkeit leidet. Die zoologische Sammlung Aldrovandis gehört zu den ältesten und ist insofern erwähnenswert.

1549.

Literatur. *Fantuzzi, Memorie della vita di Ulisse Aldrovandi, Bologna 1774.*

W. Harms.

d'Alembert

Jean le Rond.

Geboren am 16. November 1717 in Paris; gestorben am 29. Oktober 1783 ebenda. Er war ein natürliches Kind der Frau von Tencin und des Ingenieuroffiziers Destouches, eines Bruders des Dichters. Er wurde von seinen Eltern ausgesetzt und an den Stufen der Kirche Jean le Rond in Paris aufgefunden. Zu schwach befunden um in ein Findelhaus gebracht zu werden, wurde er von der Polizei einer armen Glaserfrau übergeben. Mit 4 Jahren fand d'Alembert in einer Erziehungsanstalt, mit 12 im Collège Mazarin Aufnahme. Er studierte zunächst Theologie, dann Rechte, wendete sich aber bald mit Leidenschaft mathematischen und physikalischen Studien zu. 1741 wurde er Mitglied der Pariser Akademie und gewann durch seine Arbeit Reflexions sur la cause générale des vents den Preis und die Mitgliedschaft der Berliner Akademie (1747). Streitigkeiten veranlaßten ihn, sich von den physikalischen und mathematischen Studien ab und philosophischen und literarischen zuzuwenden. Als Freidenker von den Theologen verfolgt, ging er des Akademiegehalts verlustig; trotzdem folgte er weder dem Ruf Friedrich II. noch der Kaiserin Katharina II., die ihm die Erziehung ihres Sohnes Paul antrug; von jenem bezog er ein Jahresgehalt. 1755 wurde er auf Empfehlung des Papstes Benedikt Mitglied des Instituts von Bologna. d'Alembert war ein liebenswürdiger Mensch und lebte mehr als 40 Jahre in höchst bescheidenen Verhältnissen bei seiner Pflegemutter. Die große Selbstlosigkeit seines Charakters trat in dem unglücklichen Liebesverhältnis zu der liebenswürdigen und geistreichen aber unbeständigen Madame L'Espinasse zutage.

Literatur. ***J. Bertrand,*** *Les grands écrivains français, Paris 1899. —* ***Rosenberger,*** *Geschichte der Physik II S. 289, Braunschweig 1882.*

E. Drude.

Algen.

Umgrenzung. Seit langer Zeit schon faßt man zahlreiche niedere Pflanzen unter dem Namen der Thallophyten zusammen. Sie sind einzellig oder vielzellig, ihr Vegetationskörper ist verhältnismäßig einfach gestaltet; auch bei den vielzelligen Formen ist eine weitgehende Differenzierung der Gewebe, vor allen Dingen eine Ausbildung von Gefäßbündeln und dergleichen nicht vorhanden. Das schließt nicht aus, daß in dem Gewebe eine Arbeitsteilung vorhanden ist. Der Vegetationskörper wird durch den sogenannten Thallus gebildet, der nach einer aus dem Jahre 1828 von Acharius stammenden Definition nichts anderes ist, als ein Sproß, der noch keine Gliederung in Achse und Blatt erfahren hat.

Unter obigem Namen sind nun zahlreiche größere und kleinere Pflanzengruppen vereinigt, die phylogenetisch nicht oder kaum miteinander in Zusammenhang stehen. Als Hauptgruppen unter den Thallophyten heben sich ab die Bakterien, die Algen, die Pilze. Die Algen besitzen in ihren Zellen stets Chromatophoren, die auf Grund ihrer Farbstoffe zur Photosynthese befähigt sind. Nur einige wenige Algen haben auf Grund parasitischer oder saprophytischer Lebensweise ihre Farbe eingebüßt. Die Algen sind deshalb autotroph, Pilze und Bakterien dagegen haben noch niemals eine Spur von Chromatophoren erkennen lassen, sie sind deswegen heterotroph.

An sich würde die Färbung noch nicht das Recht zu einer Scheidung dieser Gruppen bedingen. Die Trennung basiert natürlich auch auf Unterschieden in der Fortpflanzung, und im allgemeinen kann man festhalten, daß die Algen bewegliche Fortpflanzungszellen haben, während die der Pilze für gewöhnlich unbeweglich sind. Das basiert zum großen Teil auf der Lebensweise; denn die Algen sind in weitaus überwiegender Menge Bewohner des Wassers, die Pilze sind dagegen in der Hauptsache Bewohner des festen Landes, die Bakterien nehmen eine Mittelstellung ein. Wo einmal Algen auf das Land übergehen (Chroolepideen) neigen sie zur Bildung unbeweglicher Fortpflanzungszellen, wo Pilze ins Wasser geraten, produzieren sie bewegliche Schwärmer.

Bei allen Thallophyten entstehen die Fortpflanzungszellen in Ein- oder Mehrzahl, aus einer einzigen Zelle, sie sind bei ihrer Reife immer nur von einer Zellhaut umschlossen, nicht aber von einem Gewebekomplex, wie das bei den Moosen, Farnen usw. der Fall ist.

Wie weit Algen, Pilze und Bakterien untereinander verwandt seien, läßt sich kaum sagen. Mir scheint, es handelt sich um eine Anzahl von Gruppen, die selbstständig aus dem Reiche der Protisten emporsteigen. Ziemlich zweifellos ist mir das für die Algen. Unter ihnen lassen sich jedenfalls die grünen Formen ohne Schwierigkeiten auf farbige Flagellaten zurückführen. Die Bakterien gehen zweifellos auch selbständig auf niedere Protisten zurück. Wie es mit den Pilzen zumal mit den Eumyceten (vgl. den Artikel „Pilze") sei, ist schon schwieriger zu sagen. Anzunehmen, daß die Pilze farblos gewordene Algen seien, liegt für manche Forscher nahe, und besonders häufig ist diese Auffassung vertreten worden für diejenigen Ascomyceten (vgl. den Artikel „Pilze"), welche eine den Florideen ähnliche Trichogyne führen. Bewiesen ist aber in dieser Richtung nichts und noch weniger kann man sonst den Ursprung der Pilze hinreichend klar erkennen.

S y s t e m. Nach der üblichen Bezeichnungsweise umfassen die Algen folgende Gruppen:

I. Cyanophyceae

II. Zygophyceae (Acontae)

a) Conjugatae

b) Bacillariaceae

III. Chlorophyceae

a) Volvocales

1. Polyblepharidaceae
2. Chlorodendraceae
3. Chlamydomonadaceae
4. Phacotaceae
5. Volvocaceae
6. Tetrasporaceae

b) Protococcales

1. Protococcaceae
2. Protosiphonaceae
3. Halosphaeraceae
4. Scenedesmaceae
5. Hydrodictyaceae

c) Ulotrichales

1. Ulotrichaceae
2. Ulvaceae
3. Prasiolaceae
4. Cylindrocapsaceae
5. Oedogoniaceae
6. Chaetophoraceae
7. Pleurococcaceae
8. Aphanochaetaceae
9. Coleochaetaceae
10. Chroolepidaceae

d) Siphonocladiales

1. Cladophoraceae
2. Siphonocladiaceae
3. Valoniaceae
4. Dasycladaceae
5. Sphaeropleaceae

e) Siphonales

1. Codiaceae
2. Bryopsidaceae
3. Caulerpaceae
4. Vaucheriaceae

f) Charales

IV. Heterocontae

1. Chloromonadaceae
2. Confervaceae
3. Botrydiaceae
4. Chlorotheciaceae

V. Phaeophyceae

a) Phaeosporeae

1. Ectocarpaceae
2. Cutleriaceae
3. Sphaecelariaceae
4. Laminariaceae

b) Akinetosporeae

1. Tilopteridaceae
2. Choristocarpaceae

c) Cyclosporeae

1. Dictyotaceae
2. Fucaceae

VI. Rhodophyceae

a) Bangiales

b) Florideae

1. Nemalionales
2. Cryptonemiales
3. Ceramiales
4. Gigartinales
5. Rhodymeniales

Die soeben wiedergegebene Uebersicht ist natürlich nur eine von den vielen, welche als das System der Algen bezeichnet werden, sie ist aber heute wohl die geläufigste. Immerhin enthält auch sie noch Gruppen, welche phylogenetisch vielleicht sehr wenig mit dem eigentlichen Kern der ganzen Algengruppe zu tun haben.

Die oben unter I erwähnten Cyanophyceen stellen nach meinem persönlichen Empfinden eine vollkommen isolierte Gruppe dar. Sie gehören als Spaltpflanzen mit gewissen Formen zusammen, die man heute immer noch mit einem geradezu bewundernswürdigen Beharrungsvermögen unter die Bakterien (Trichobakterien) zählt. Beide werden in dem Artikel „S p a l t p f l a n z e n" behandelt.

Etwas isoliert unter den Algen stehen auch die Zygophyceen (II), die man häufig in Conjugaten und Diatomeen gliedert. Ob sie zusammen gehören, ist keineswegs sicher; über ihren Ursprung herrschen mannigfache Ansichten und mannigfache Zweifel. Vielleicht beseitigt sie der Bearbeiter dieser Pflanzengruppe, welche wir auch aus rein äußeren Gründen von den Algen trennen und in den Artikeln „C o n j u g a t e n" und „D i a t o m e e n" abhandeln. Was nach Abzug dieser Gruppe übrig bleibt, ist relativ einheitlich, aber auch keineswegs unumstritten.

III. Chlorophyceae.

Nicht alle Algologen verstehen unter diesem Namen genau das gleiche. Wir fassen den Begriff etwas enger als andere Forscher, und beschränken ihn auf diejenigen Algen, welche durch folgende Merkmale gekennzeichnet sind:

Die Farbe der Chromatophoren ist rein grün, und so entsteht eine Gesamtfärbung, die der unserer heimischen Gräser am ehesten gleicht. Die Chromatophoren produzieren als Assimilations- und Reserve-Stoff Stärke. Diese wird in erster Linie an den Pyrenoiden (Stärkeherden) gebildet. Solche Organe fehlen nur wenigen Vertretern dieser Gruppe, und dann erscheint die Stärke regellos über den Chromatophor verteilt. In pyrenoidlosen Zellen kann auch Oel an Stelle der Stärke gebildet werden.

Charakteristisch für die Chlorophyceen ist auch die Form der beweglichen Zellen, der „Schwärmer". Diese sind birnförmig und tragen am spitzen Vorderende zwei oder vier völlig gleiche Geißeln. Im breiten Hinterende führen sie einen Chromatophor, der eine mehr oder minder gebogene Platte oder aber einen Becher darstellt. Dem Chromatophor angeheftet ist ein roter Körper, den man als Augenfleck bezeichnet. Die Schwärmer besitzen an ihrem Vorderende eine pulsierende Vakuole. Die Geißeln sind meistens einem zäpfchenartigen Fortsatz seitlich angeheftet (vgl. Fig. 2).

Die so skizzierten Gruppen kann man in die fünf nebenstehend genannten Unterabteilungen zerlegen.

Diese Gliederung basiert in erster Linie auf vegetativen Merkmalen. Die Fortpflanzungserscheinungen sind für die getroffene Unterscheidung nicht in dem Umfange maßgebend gewesen, wie das sonst wohl der Fall zu sein pflegt. Allein wir werden zu zeigen haben, daß gerade hier eine Anzahl parallel gehender Gruppen gegeben ist, die alle mit isogamen Vertretern beginnen und mit oogamen ihren Höhepunkt erreichen.

Die Chlorophyceen leiten sich her von grünen Flagellaten. Zoosporen und bewegliche Gameten dürften Rückschläge auf eben jene Vorfahren sein. Die niedersten Vertreter der hier zunächst zu behandelnden Reihe stehen den Ursprungsformen sehr nahe.

a) Volvocales. Das Anfangsglied dieser

außerordentlich interessanten Reihe bilden Organismen, welche zeitlebens die Form der oben skizzierten Schwärmer ungefähr beibehalten. Wir erwähnen zunächst die

1. **Polyblepharidaceae** und unter diesen die Gattung Pyramimonas (Fig. 1). Das sind, wie schon der Name sagt, pyramidale Formen, welche insofern von dem Typus abweichen, als die Spitze der Pyramide das Hinterende, die Basis das Vorderende darstellt. Das Vorderende der Zelle trägt vier lange Geißeln und ist außerdem mit vier flügelartigen Fortsätzen versehen. Der

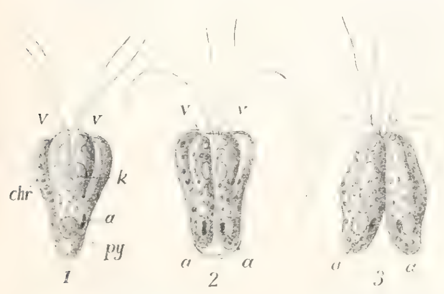


Fig. 1. Pyramimonas. 1 Vegetative Zelle, 2, 3 Teilungsstufen, k Kern, chr Chromatophor, py Pyrenoid, a Augenfleck, v Vakuole.

Chromatophor liegt am spitzen Hinterende und entsendet paarige Lappen gegen das Vorderende. Augenfleck und Pyrenoid sind weit gegen das Hinterende verschoben. Der Kern liegt in dem durch den Chromatophor und dessen Lappen gebildeten Becher. Eine Zellhaut ist nicht vorhanden, und deswegen ist es der ganzen Zelle möglich, Formänderungen zu vollziehen.

Die Fortpflanzung geschieht durch Längsteilungen. Vom Hinterende her wird (Fig. 1) die ganze Zelle gleichsam der Länge nach durchschnitten. Schon vor dieser Längsteilung hat sich die Zahl der Geißeln vermehrt, so daß nachher auf jede Tochterzelle wiederum vier Geißeln kommen. Zwei davon rühren von der Mutterzelle her, zwei sind neu gebildet.

Eine geschlechtliche Fortpflanzung von Pyramimonas ist nicht bekannt. Unter ungünstigen Bedingungen können aber die beweglichen Zellen sich abrunden und sich mit einer derben Haut umgeben. Unter günstigen Bedingungen schlüpfen aus diesen wieder bewegliche Zellen aus.

2. Die **Chlorodendraceae** haben Zellen, welche denen der vorigen Familie sehr ähnlich gebaut sind, diese aber umgeben sich mit einer Zellhaut und vereinigen sich zu bäumchenförmigen Kolonien in sehr eigenartiger Weise. Die Zellen, welche auch in der Hülle ihren Augenfleck zu behalten pflegen, schlüpfen zur Vermehrung in toto aus; nachdem sie Geißeln erhalten haben, setzen sich fest und bilden neue Kolonien.

3. **Chlamydomonadaceae.** Die für diese Familie typische Gattung ist Chlamydomonas. Sie unterscheidet sich, wie alle Vertr ter unserer Gruppe, von der vorhergehenden dadurch, daß die Zellen von einer festen Haut umgeben sind, welche natürlich nunmehr Umrißänderungen ausschließt. Das hindert nicht, daß Geißeln vorhanden sind. Diese treten neben einer am Vorderende von der Membran gebildeten Warze hervor (Fig. 2). Dicht unter der Geißelbasis liegen 1 oder 2 pulsierende Vakuolen. Der Chromatophor ist becherförmig und hat an seiner Basis mindestens ein Pyrenoid. Die Becher können am Rande geschlitzt, gelappt usw. sein. Der Augenfleck liegt immer dem Chromatophorbecher außen auf (Fig. 2). Der Kern hat den üblichen Platz.

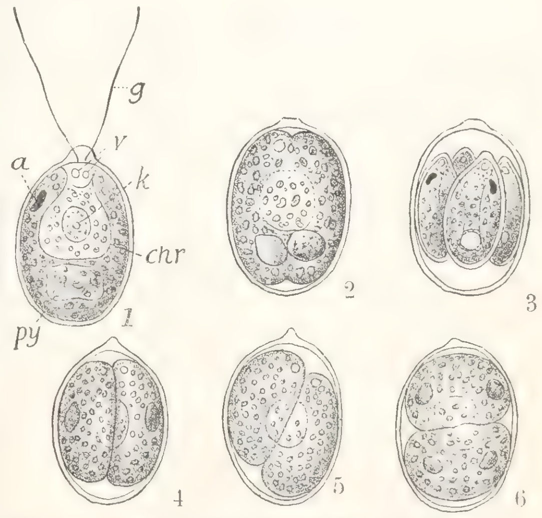


Fig. 2. 1—3 Chlamydomonas angulosa Dill. 4—6 Chlamydomonas longistigma Dill. Teilungsstufen, g Geißeln, v Vakuolen, k Kern, chr Chromatophoren, py Pyrenoid.

Chlamydomonas hat zwei, Carteria hat vier Geißeln. Die Gattung Haematococcus fällt dadurch auf, daß die Wandung sich von dem Zellinhalt weit abhebt. Letzterer aber entsendet zahlreiche Plasmafortsätze bis an die Peripherie. Haematococcus erhielt seinen Namen von dem roten Farbstoff, der in die Zellen unabhängig vom Chlorophyll eingelagert ist. Die Gattung Polytoma ist farblos.

Die Vermehrung der Chlamydomonaden erfolgt zunächst durch Zoosporen. In jeder Zelle entstehen 2 bis 8 solcher Gebilde. Der Inhalt der beweglichen Zellen mit allen Organen des Plasmaleibes wird durch eine Längsteilung zunächst in zwei, dann eventuell in mehrere Portionen zerlegt (Fig. 2). Jede so entstandene Plasmamasse bildet selbständig

neue Geißeln aus, und wenn dies geschehen ist, reißt die alte Haut auf, und die jungen Schwärmer schlüpfen heraus. Hier haben also die Geißeln der Tochterzelle mit denen der Mutterzelle gar nichts zu tun. Längsteilungen sind ganz vorzugsweise den Flagellaten eigen, und wenn man auch unsere Familien daraufhin noch zu diesen rechnen will, mag man das tun. Interessant ist es nun aber, daß gewisse Arten der Gattung Chlamydomonas ihre Schwärmer durch Querteilung der Zelle bilden und endlich, daß es einzelne Spezies gibt, welche zunächst eine Längsteilung vollziehen, dann aber ihren gesamten Inhalt in der alten Hülle um 90° drehen, um nun die Teilungen fortzusetzen. Das sind natürlich Uebergänge von der primitiveren Teilungsart zu derjenigen, welche allmählich bei den Algen üblich geworden ist. Die Zoosporen schlüpfen aus der Mutterzelle aus und wachsen ohne besondere Formalität zu der normalen Größe der Mutterzellen heran.

Manche Arten der Gattung Chlamydomonas verlieren unter gewissen Bedingungen ihre Geißeln. Die nunmehr ruhenden Zellen teilen sich trotzdem weiter, die Zellwände bleiben erhalten, quellen aber stark auf und so entstehen Gruppen grüner Zellen, welche durch die alten verquollenen Wände zusammengehalten werden — Palmellastadien. Unter geeigneten Bedingungen werden die Zellen wieder beweglich.

Die geschlechtliche Fortpflanzung erfolgt durch Gameten. Diese werden wie die Zoosporen gebildet, sind aber meist kleiner als diese; entstehen sie doch in etwas größerer Zahl in den Mutterzellen. Im Bau unterscheiden sie sich von den Zoosporen nicht oder kaum; in manchen Fällen sind sie von einer Zellulosehaut umgeben.

Alle Gameten sind untereinander annähernd oder völlig gleich gestaltet — Isogameten. Sie vereinigen sich paarweise, gegebenenfalls unter Sprengung ihrer Haut (Fig. 3) und bilden unter Verlust der Geißeln eine Zygote, die sich vollends abrundet und sich mit einer derben Haut umgibt. Der Zygoteninhalt färbt sich meist ziegelrot. Allgemeines über diese Vorgänge ist in dem Artikel „Fortpflanzung der Pflanzen" zu finden. Die Zygoten können in diesem Zustande sogar das Austrocknen vertragen, auch sonst ungünstige Zeiten überstehen. Sie keimen unter Zoosporenbildung oft sehr rasch. Die alte Haut wird aufgerissen.

Die Chlamydomonaden leben in Süßwassertümpeln usw. Trocknen diese aus, so erhalten sie sich durch die Zygoten. Nährstoffreiche Gewässer, auch solche, die organische Substanzen führen, werden bevorzugt (Dorfteiche). Doch kommen die hierhergehörigen Hämatokokken auch in nur periodisch wasserhaltigen Felslöchern vor und färben sie zuweilen blutrot. Nach dem Austrocknen färben die Zygoten deren Boden gelb (goldene Schüsselsteine).

4. Die **Phacotaceae** sind Chlamydomonaden mit 2-klappiger Haut.

5. **Volvocaceae.** In dieser Familie haben sich Zellen vom Bau der Chlamydomonas zu Kolonien oder Individuen vereinigt.

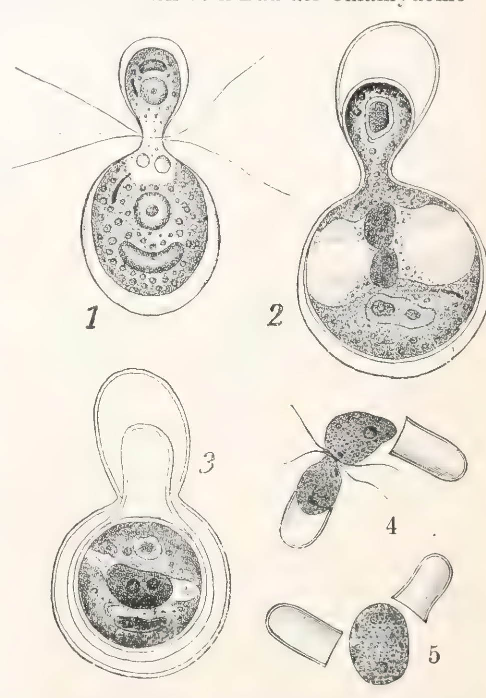


Fig. 3. Copulation der Gameten. 1—3 bei Chlamydomonas Braunnii Gor. Nach Gorechankin. 4. und 5. bei Chlamydomonas media. Nach Klebs.

In den unteren Gliedern der Genossenschaft sind alle Zellen gleich und mit den gleichen Funktionen betraut, in den höheren tritt Arbeitsteilung ein zwischen somatischen und Fortpflanzungs-Zellen; in den unteren herrscht Isogamie, in den oberen Oogamie in der ausgeprägtesten Form. Drei Typen illustrieren das alles.

Pandorina (Fig. 4) bildet kugelförmige oder auch ellipsoidische Körper. In eine Gallertmasse eingebettet liegen meist 16 Zellen. An der Peripherie breit, verjüngen sie sich naturgemäß gegen die Kugelmitte. Bau der Einzelzelle wie bei Chlamydomonas, also Becherchromatophor, mit Pyrenoid usw., Augenfleck fehlt an keiner Zelle, und von jeder derselben werden 2 Geißeln durch die gemeinsame Gallerthülle nach außen gestreckt. Zwecks ungeschlechtlicher Fortpflanzung teilt sich jede Zelle einer Kugel nach einem unten zu erörternden Gesetz mehrfach derart, daß aus ihr eine neue Kugel

entsteht (Fig. 4). Die Tochterkugeln verlassen dann die gemeinsame Hülle und können nach einiger Zeit wiederum in Tochterkolonien aufgelöst werden.

Die geschlechtliche Fortpflanzung von Pandorina geschieht dadurch, daß in einer Kugel sämtliche 16 Zellen in 16 Tochterkugeln geteilt werden. Die Zellen dieser letzteren schlüpfen aus der sie umgebenden

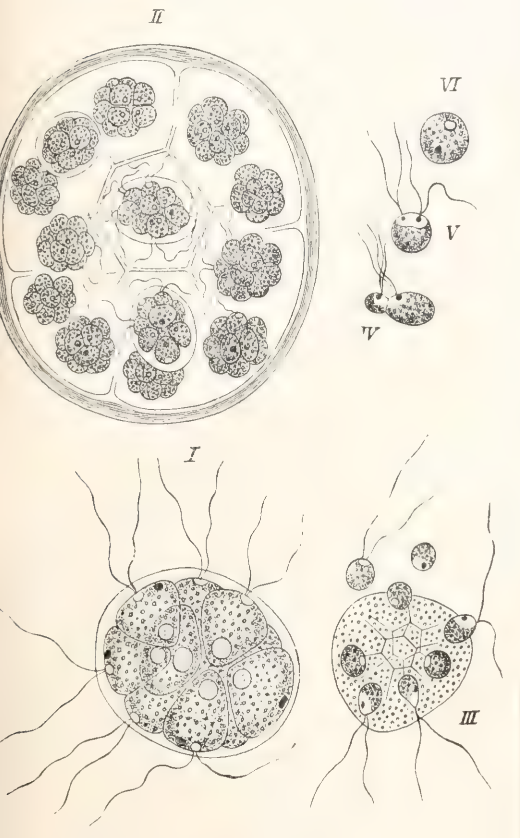


Fig. 4. Pandorina Morum. I vegetative Familie, II Bildung von Tochterfamilien, III Ausschlüpfen der Gameten, IV—VI Kopulation derselben.

Gallerthaut hinaus und stellen Gameten dar, welche mit zwei Geißeln versehen sind, und sich von den Gameten der Chlamydomonas kaum unterscheiden. Es vereinigen sich je zwei Gameten, welche aus verschiedenen Kugeln stammen. Dabei sieht man dann, daß sich in einem Gametenpaar eine größere und eine etwas kleinere Zelle deutlich unterscheiden lassen. Außer diesen Größenunterschieden sind aber Differenzen nicht gegeben.

Die entstehenden Zygoten sind wiederum augenfällig rot gefärbt und natürlich mit einer derben Membran umgeben.

Die Gattung Eudorina (Fig. 5) ist im wesentlichen so gebaut wie Pandorina; doch finden wir hier in einer Kugel 32 Zellen vereinigt, welche ziemlich weit voneinander entfernt liegen, aber durch eine Gallerthülle zusammengehalten werden. Die Bildung von Tochterkugeln erfolgt in der gleichen Weise wie bei Pandorina. Dagegen ist die geschlechtliche Fortpflanzung ganz wesentlich verschieden. Man kann ohne Schwierigkeiten männliche und weibliche Kolonien unterscheiden. In den weiblichen Kolonien wird jede einzelne Zelle dadurch, daß sie sich noch stärker als vorher abrundet, zu einem Ei. In den männlichen Kugeln teilt sich jede grüne Zelle zunächst genau so, als ob es Tochterkolonien geben sollte. Aber späterhin

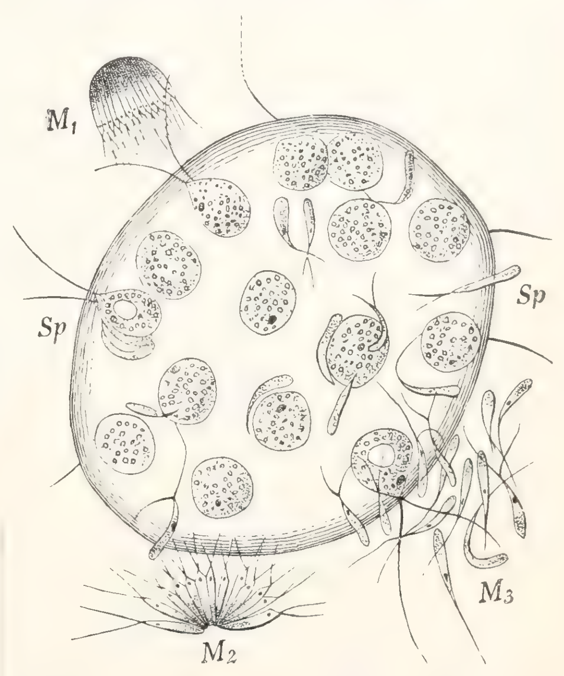


Fig. 5. Eudorina elegans. Weibliche Familie umgeben von Spermatozoiden, Sp Spermatozoiden, M Bündel von solchen.

wird die Entwickelung eine etwas andere. Durch vielfach wiederholte Teilungen entsteht eine Platte, die aus zahlreichen kleinen Zellen aufgebaut wird, welche stäbchen- oder palisadenartig aneinander liegen. Das sind die Spermatozoiden. Jedes derselben erhält einen Teil des Chromatophors. Aber diese kleinen Teilchen bleiben nicht mehr grün, sondern erscheinen gelb. Jedes Spermatozoid erhält an dem spitzen Ende ein Paar Geißeln. Wenn diese entwickelt sind, schlüpft die ganze Stäbchenplatte aus der Mutterzelle aus und bewegt sich mit Hilfe der Geißeln, welche alle nach einer Seite gerichtet sind, gegen die weiblichen Kolonien hin. Dort angekommen, zerfällt

die Platte (Fig. 5) in die einzelnen Spermatozoiden. Je eines derselben befruchtet eine Eizelle, und nun entstehen wiederum die eigenartig gefärbten Zygoten. Keimen dieselben unter günstigen Bedingungen, so wandelt sich der Inhalt durch gesetzmäßig aufeinander folgende Wände in eine neue Kugel um, die im gegebenen Moment die alte Zygotenhaut verläßt.

Volvox hat in unserer Familie die höchste Ausbildung erfahren, und zwar deswegen, weil wir hier eine Trennung in vegetative oder somatische Zellen und in generative zu verzeichnen haben. Die Pflanze bildet Kugeln, welche bis zu 1 mm im Durchmesser erreichen.

Die Volvoxkugeln sind im Innern von einer dünnflüssigen, wohl schleimähnlichen Masse ausgefüllt. An der Oberfläche tragen sie eine Schicht von grün gefärbten Zellen. Die Mehrzahl dieser Zellen ist von nur geringer Größe, hat aber alle die Eigenschaften, welche auch den größeren Einzelzellen der Chlamydomonas zukommen. Wir sehen zwei Geißeln, die nach außen gestreckt sind, eine pulsierende Vakuole, einen nur schwach gebogenen Chromatophor und einen Augenfleck. Auffallend ist, daß diese Augenflecke an der Vorderseite der Volvoxkolonien größer sind als am Hinterende. Schon daraus ergibt sich, daß die Vertreter dieser Gattung eigentlich keine Kugeln darstellen, sondern Ellipsoide, an denen man Vorder- und Hinterende unterscheiden kann. Das Vorderende geht bei der durch die Geißeln hervorgerufenen Bewegung voran.

Die Polarität zeigt sich auch darin,

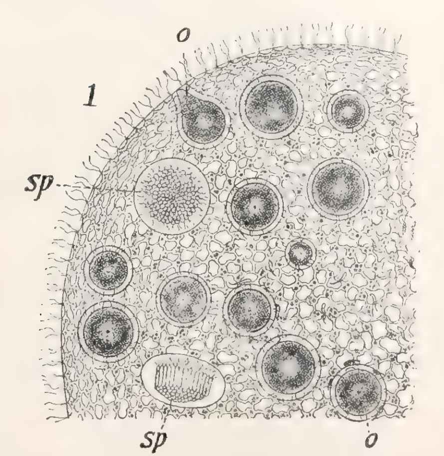


Fig. 6. 1 Volvox globator. o Oogonien, sp Spermatozoiden.

daß die Fortpflanzungszellen fast immer an dem Hinterende des Ellipsoids gelegen sind.

Bei der geschlechtlichen Fortpflanzung wird genau wie bei Eudorina eine Eizelle durch ein Spermatozoid befruchtet. Die Eizellen (Fig. 6), welche nur in mäßiger Zahl (selten über 30) vorhanden sind, fallen nicht bloß durch ihre dunkelgrüne Färbung, sondern auch durch ihre erhebliche Größe auf. Sie ragen mit dem Hinterende in das Kugelinnere hinein. Die Spermatozoiden (Fig. 6 sp) sind wie bei Eudorina. Die entstehenden Zygoten sind wiederum intensiv rot gefärbt. Bei der Keimung derselben schlüpft, nach vorausgegangener Teilung des Inhalts, eine Kugel aus ihnen heraus.

Die ungeschlechtliche Vermehrung erfolgt aus den sogenannten Parthenogonidien. Am Hinterende des Ellipsoids bemerkt man schon an recht jungen Individuen 5 bis 20 gerundete Zellen, welche größer sind, als die vegetativen. Aus diesen wird durch einen eigenartigen Teilungsprozeß eine neue Kugel gebildet. Die Mutterzelle wird zunächst durch zwei aufeinander senkrechte Wände in eine vierzellige Platte zerlegt. Diese Platte teilt

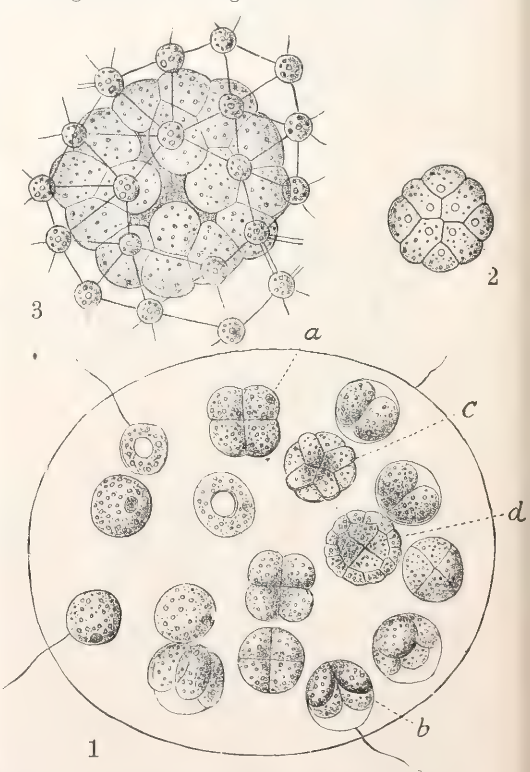


Fig. 7. 1 Eudorina. Eine Kugel mit den ersten Teilungsstufen zur Bildung neuer Kugeln, 2, 3 junge Kugeln von Volvox globator. Nach Klein.

sich weiter, so daß Kreuzformen entstehen. Erst wenn eine verhältnismäßig große Zahl von Zellen gebildet worden ist, krümmt die Platte sich ein und gestaltet sich allmählich

zu einer hohlen Kugel, an welcher aber noch lange (Fig. 7) eine Oeffnung sichtbar ist. Auch aus dieser Entwickelung geht hervor, daß der Ausdruck „Kugel“ eigentlich nicht exakt ist, aber der Bequemlichkeit halber wird er immer noch angewendet.

Die eben geschilderte Entwickelung der Tochterindividuen kommt allen kugeligen Vertretern der Familie der Volvocaceen zu (Fig. 7). Man kann vielleicht daraus schließen, daß alle diese Gebilde von plattenförmigen Kolonien abzuleiten sind. Und tatsächlich gibt es tafelförmige Gattungen in unserer Familie. Altbekannt ist die Gattung Gonium, bei welcher 16 chlamydomonasähnliche Zellen eine einfache Platte bilden. Neu entdeckte ich Pleodorina, mit schwach schraubig gewundener Platte.

Die Volvocaceae sind wohl in allen Weltteilen Planktonten des Süßwassers. Sie schweben in stagnierenden Gewässern aller Art und treten gelegentlich so massenhaft auf, daß größere und kleinere Tümpel allein von ihnen grün gefärbt werden,

Die Entwickelung des Volvox erfolgt im allgemeinen so, daß vom ersten Frühjahr an nur geschlechtliche Vermehrung stattfindet. Je wärmer aber die Gewässer werden, in denen die Pflanze lebt, um so mehr geschlechtliche Individuen treten auf und im Juni sind in den meisten Gegenden Deutschlands nur noch geschlechtliche Individuen zu finden. Dann pflegt die Pflanze auf Grund ihrer Zygotenbildung zu verschwinden. Im Herbst keimen die Zygoten und etwa vom September bis Oktober an findet man dann, bis tief in den Winter hinein, auch meist noch unter dem Eise, lebende Individuen des Volvox; viele erhalten sich durch den ganzen Winter.

Die anderen Gattungen verhalten sich ähnlich.

6. Tetrasporaceae. Schon bei den Chlamydomonaden sahen wir gelegentlich Ruhestadien auftreten, bei den Tetrasporeen aber haben die Zellen eine dauernde Einbettung in Gallerte erfahren. Damit haben sie natürlich ihre Beweglichkeit eingebüßt und erlangen sie nur bei der Fortpflanzung wieder.

Apiocystis stellt birnförmige Körper dar, welche mit verschmälertem Fuß dem Substrat aufsitzen. Die Birne ist innen mit einer Flüssigkeit gefüllt, hat außen eine Gallertwand und in diese eingeschlossen liegen die grünen Zellen, häufig in Gruppen von 4 oder 8 beisammen. Diese Lagerung weist deutlich auf die Entstehung durch succedane Zweiteilung hin.

Auffallend sind die Pseudocilien der Apiocystis. Von den Zellen treten je zwei Protoplasmafortsätze durch die Plasmawand hindurch und ragen auch über diese weit hinaus. Sie sind aber unbeweglich, weil sie bis an ihr äußerstes Ende von einer Gallertscheibe umhüllt sind.

Tetraspora bildet in der Jugend ebenfalls hohle festgewachsene Gallertschläuche, später aber lösen sich diese los und schweben als unregelmäßige Massen im Wasser. Auch hier sind grüne Zellen in eine farblose Masse eingebettet und wieder mit Fortsätzen von der oben beschriebenen Form versehen.

Zur ungeschlechtlichen Vermehrung erhalten die grünen Zellen ganz unabhängig von den Pseudocilien zwei echte Geißeln und schlüpfen aus der Gallerte aus. Nun erkennt man noch deutlicher als zuvor, daß sie den Chlamydomonaden im Bau eminent ähnlich sind. Mehrere Tage lang können sie sich wie diese benehmen, indem sie sich frei bewegen. Später kommen sie dann zur Ruhe und bilden unter Teilung neue Pflänzchen.

Die geschlechtliche Fortpflanzung erfolgt durch gleich gestaltete Gameten, welche in nichts von anderweit bekanntem abweichen.

b) Protococcales. Diese Gruppe ist ausgezeichnet dadurch, daß ihre vegetativen Zellen unbeweglich sind. Fadenbildung ist selten. Wir finden vielmehr meistens Einzelzellen oder eine Kombination solcher zu Kugel- und Netzverbänden. Die Chromatophoren pflegen becher- oder plattenförmig zu sein. Die untersten Glieder dieser Reihe sind nichts ande es wie dauernd zur Ruhe gekommene Chlamydononaden.

1. Protococaceae. Als einfachster Vertreter derselben mag Chlorococcum (Chlorosphaera limicola Fig. 8) betrachtet werden. Diese Alge bildet kugelrunde Zellen, welche mit einer Zellulosemembran umgeben sind. Der Chromatophor ist eine Hohlkugel mit einer ziemlich weiten Oeffnung. Der Oeffnung gegenüber liegt ein Pyrenoid, ungefähr so, wie das auch in Figur 8 wiedergegeben ist. Der Zellkern liegt ziemlich genau in der Mitte der Zelle. Es ist somit deutlich, daß es sich hier um nichts anderes handelt,

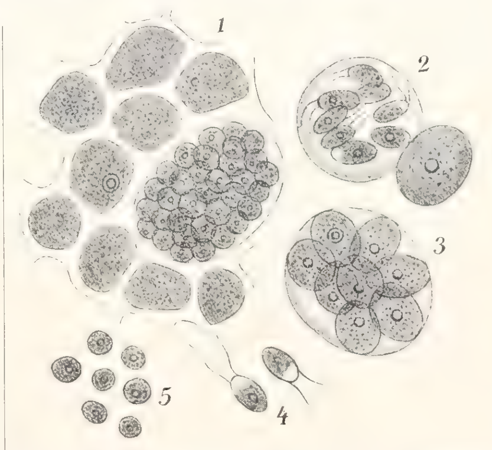


Fig. 8. Chlorosphaera limicola (= Chlorococcum). 1 vegetative Zellen, eine davon mit Aplanosporen, 2 3 Zoosporen noch von einer Blase umhüllt, 4 Zoosporen frei, 5 dieselben nach Umhüllung mit Membran.

wie um eine Chlamydomonas, welche sich abgerundet und ihre Geißeln eingebüßt hat. Die Fortpflanzung erinnert ebenfalls stark an die genannte Gattung. Wir finden niemals Zweiteilungen, sondern nur die Bildung von Zoosporen (Fig. 8) mit zwei Geißeln. Diese werden unter Wachstum und Abrundung sofort wieder zu einer kugelförmigen umhäuteten Zelle. Unter ungünstigen Bedingungen, z. B. in konzentrierten Nährlösungen, können auch sogenannte Aplanosporen gebildet werden; das sind Zoosporen, welche keine Geißeln bilden, und welche infolgedessen in unbeweglichem Zustande durch Platzen der Wand aus den Mutterzellen entleert werden. Weitere Fortpflanzungszellen sind nicht bekannt.

An Chlorococcum kann man das eigenartige Chlorochytrium Lemnae anschließen; das sind grüne Kugeln, welche in den Interzellularräumen der Wasserlinse leben. Auch diese Zellen erfahren keine Zweiteilung; sie bilden Schwärmer mit zwei Geißeln, welche, zunächst in eine große Blase eingehüllt, aus der Mutterkugel hervortreten. Die Schwärmer erweisen sich als Gameten. Nachdem sie sich paarweise zu einer Zygote vereinigt haben, dringt diese letztere wieder in das Lemnagewebe ein. Ein Unterschied von Chlorococcum besteht nur insofern, als die Schwärmer hier tatsächlich Gameten sind, was bei der ersten Gattung zum mindesten nicht zu erweisen ist.

Vielleicht gehört in die Verwandtschaft von Chlorosphaera auch noch das eigenartige Phyllobium dimorphum, welches in dem Gewebe von Sumpfpflanzen lebt. Die Gametenbildung ist die gleiche wie bei der früheren Gattung, aber es darf nicht verschwiegen werden, daß kurze Fäden an gewissen Stellen entstehen.

2. **Protosiphonaceae.** Die Gruppe ist vertreten durch die viel besprochene Gattung Protosiphon, welche zeitweilig mit Botrydium verwechselt wurde. Es handelt sich um eine Erdalge. Dieselbe stellt eine einzige, relativ große, schlauchförmige Zelle dar (Fig. 9). Bei den typischen Formen finden wir eine grüne Blase oberhalb des Bodens und von ihr ausgehend einen farblosen Schlauch, welcher in den letzteren eindringt. In der Kultur zeigen sich mancherlei Abweichungen. Die Kugelzelle beherbergt einen Netzchromatophor mit vielen Pyrenoiden. Auf der Innenseite des ersteren liegen dann zahlreiche Zellkerne.

Die Vermehrung kann dadurch erfolgen, daß die Blase seitwärts eine kugelige Aussprossung treibt (Fig. 9), welche nach unten eine farblose Wurzel entsendet und sich dann von der Mutterzelle loslöst. Beim Austrocknen des Bodens zerfällt das Plasma in eine Anzahl von Portionen, welche sich kugelig abrunden, mit einer derben Haut umgeben und schließlich rot färben. Wir bezeichnen die Kugeln als Cysten; sie enthalten ein Stück Chromatophor und mehrere Kerne. Unter günstigen Bedingungen können diese Cysten direkt wieder auskeimen, oder aber es können auch, besonders nach längerer Ruhezeit, aus ihnen Gameten hervorgehen. Diese Gameten entstehen aber auch, und zwar häufiger und zahlreicher, aus den in der Erde wurzelnden Pflanzen, wenn diese unter Wasser gesetzt werden (Fig. 9). Der

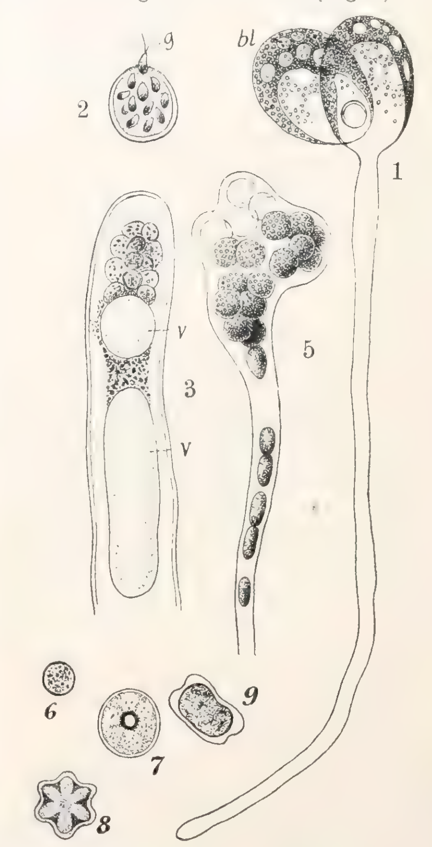


Fig. 9. Protosiphon. 1. Zellen, welche isoliert wachsen, in Verzweigung begriffen, 2 3 Schwärmerbildung in verschieden alten Zellen, 5 Cysten z. T. entleert, 6 Parthenospore 7 Keimling aus derselben, 8 9 Zygoten. g Gameten; bl junge Blasen; v Vakuolen.

Prozeß kann unter Umständen in 3 Stunden vor sich gehen. Die Gameten sind Isogameten, sie bilden sternförmige Zygoten, welche längere Zeit ruhen. Unter gewissen äußeren Bedingungen, die Klebs auch in der Kultur nachahmen konnte, werden die Gameten ohne Verschmelzung zu Parthenosporen. Diese sind grünkugelige Zellen, welche meistens bald und direkt zu neuen Pflanzen auswachsen.

3. Halosphaeraceae. Halosphaera viridis (Fig. 10) stellt große grüne Kugeln von ½ mm Durchmesser dar, welche zumal im Plankton der wärmeren Meere sehr auffallen. Die Mitte der Zelle nimmt eine riesige Vakuole ein. Der Plasmawandbelag beherbergt einen Kern und zahlreiche kleine Plättchen-Chromatophoren. Die Wand der Zelle ist dünn. Wenn letztere wächst, werden die äußersten Membranschichten gesprengt und abgestreift (Fig. 10, 2).

Die Zoosporenbildung beginnt mit netziger Anordnung des Plasmas und vielfacher Kern-

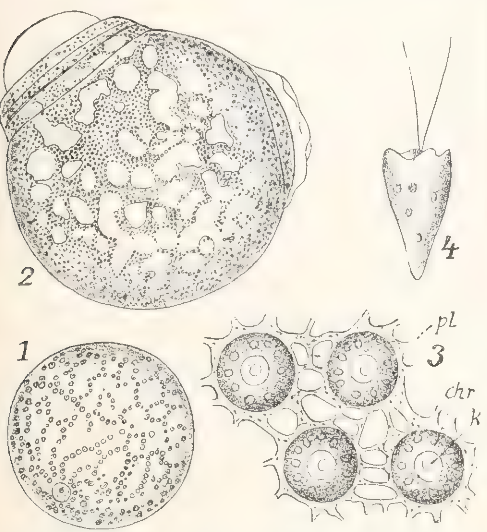


Fig. 10. Halosphaera. 1 junge Kugel, 2 etwas ältere Zelle in der Häutung, 3 Plasma-Wandbelag in der Zoosporenbildung, 4 Schwärmer.

teilung. Diese Kerne ordnen sich in gleichen Abständen, um sie sammeln sich Chromatophoren und Plasma (Fig. 10, 3). Die so entstehenden Klumpen bilden nach nochmaliger Kernteilung Schwärmer, die dann endlich durch Aufreißen der Kugel ins Wasser gelangen. Die Schwärmer erinnern mit den umgekehrt kegelförmigen Umrissen an Pyramimonas.

4. Scenedesmaceae. In dieser Familie fehlen sämtliche Bewegungsorgane. Einfachster Vertreter ist Chlorella. Der Bau ihrer Zelle ist derselbe wie bei Chlorosphaera, die Vermehrung erfolgt durch vier und mehr kugelförmige, mit Membran umhüllte Zellen, welche durch wiederholte Teilung aus der Mutterzelle gebildet werden (Fig. 11). Diese Zellen entsprechen genau den Aplanosporen von Chlorosphaera. Weitere Fortpflanzungsorgane sind nicht bekannt, höchstens werden Akineten gebildet. Bei Trockenheit nämlich umgeben sich die normalen grünen Zellen mit einer dicken Haut und in diesem Zustande können sie längere Zeit ruhen.

Von dieser Chlorella leiten sich nun viele Gattungen her, deren Zellen sehr verschieden gestaltet sind, die aber doch immer wieder den gleichen Fortpflanzungsmodus zeigen, nämlich die Bildung von unbeweglichen Tochterzellen. Wir können hier nur Scenedesmus erwähnen. Es handelt sich um ovale oder ähnlich gestaltete Zellen, welche an den beiden Enden ausgezogen sind, oder anderweitig Fortsätze tragen. Vier bis acht Zellen werden zu einem kurzen Bande vereinigt (Fig. 11, 5. 6). Jede Zelle bildet ein neues Band, welches unter Platzen der Muttermembran austritt (Fig. 11, 6). Unter gewissen Bedingungen können sich die Zellen

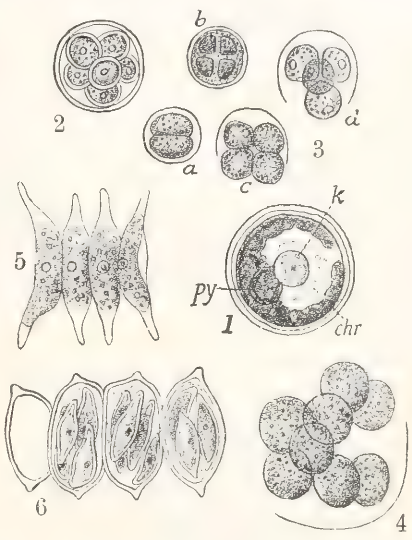


Fig. 11. 1 Zelle von Coelastrum proboscideum, 2 Chlorella conglomerata, 3 Chlorella miniata (Pleurococcus, Palmellococcus m.) in verschiedenen Stadien der Aplanosporenbildung, chr Chromatophor, py Pyrenoid, k Kern. 4 Scenedesmus acutus, Kugelzellen, 5 derselbe, normale Kolonie, 6 derselbe, in Vermehrung begriffen.

von Scenedesmus abrunden und dann vier bis acht kugelförmige Zellen in ihrem Innern erzeugen. Das ist offenbar ein Rückschlag auf die Stammform (Fig. 11, 4).

Als dritter Vertreter mag Coelastrum erwähnt sein. Bei dieser Gattung sind 16 und mehr Zellen zu einer netzigen, hohlen Kugel in ganz charakteristischer Weise vereinigt (Fig. 12). Jede Zelle dieser Kugel kann wieder eine neue Kugel produzieren. Einen anderen Fortpflanzungsmodus gibt es aber auch hier nicht.

Diese und ähnliche Gattungen sind Plankton-Organismen des Süßwassers. Chlorella u. a. Formen kommen in Tümpeln und Gräben vor, gehen aber auch mit Vorliebe eine Symbiose mit Tieren (Hydra) oder mit Pilzen zur Bildung von Flechten ein.

5. Hydrodictyaceae. Der bekannteste Vertreter dieser Gattung ist das Wassernetz

Hydrodictyon (Fig. 13), schon den Botanikern des 17. Jahrhunderts bekannt. Die 10 bis 20 cm langen Netze kommen in stagnierenden Gewässern vor, sie werden aufgebaut aus zahlreichen großen zylindrischen Zellen, die an ihren Enden jeweils zu dritt

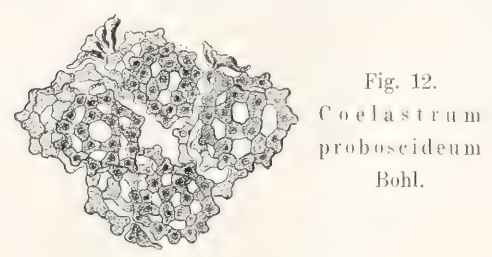


Fig. 12. Coelastrum proboscideum Bohl.

aneinander stoßen, so daß, in der Regel wenigstens, sechseckige Maschen entstehen. Die Einzelzellen haben wieder einen Netzchromatophor mit zahlreichen Pyrenoiden, welcher der Wand anliegt. Der Innenseite des Farbstoffträgers sind dann wieder zahlreiche Kerne angelagert. Die Mitte des

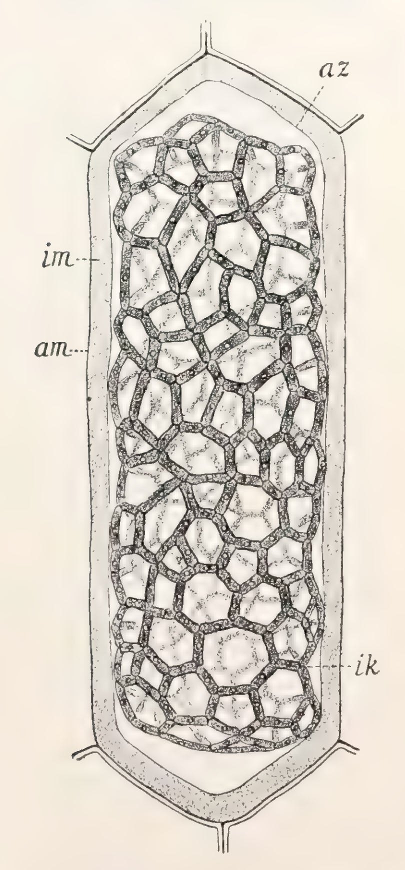


Fig. 13. Hydrodictyon, junges Netz noch in der Mutterzelle liegend, az alte Zelle, ik junge Kolonie, im innere, am äußere Wandschicht.

Ganzen füllt eine einzige Vakuole aus. Ungeschlechtliche Vermehrung erfolgt dadurch, daß in jeder Zelle ein neues Netz gebildet wird, und zwar unter Vermittlung von Zoosporen. Solche werden nach den üblichen Regeln in einer Schlauchzelle gebildet, sie bewegen sich auch mit Hilfe von Geißeln in derselben, aber sie treten nicht aus, gruppieren sich vielmehr sofort zu einem neuen Netz. Dieses wächst dann heran und verläßt die Haut der Mutterzelle.

Daneben gibt es eine geschlechtliche Vermehrung durch Isogameten, welche in der üblichen Weise zu Dauerzygoten werden. Diese beginnen nach einer Ruhezeit langsam zu wachsen und teilen sich dann in einige wenige große Zoosporen. Zur Ruhe gekommen werden letztere unregelmäßig sternförmig und umgeben sich mit einer derben Haut — Polyeder. Aus diesen geht dann wiederum ein neues Netz hervor.

In dieselbe Familie gehört auch das scheibenförmige Pediastrum.

c) Ulothrichales. Diese Gruppe bildet Fäden, welche in gewissen Verwandtschaftskreisen unverzweigt sind, in anderen sich aber reich verästeln, ja gelegentlich in Flächen und Scheiben übergehen. Die Zellen sind stets einkernig, ebenso ist ein Chromatophor vorhanden, welcher plattenförmig gebogen und vielfach mit Pyrenoiden versehen ist. Stellt man sich vor, daß sich grüne Flagellaten mit Haut umgäben und dann Teilungen stets in einer Richtung vollzögen, so kommt man auf die einfachsten Ulothricheen.

a) Ulothricheen-Reihe.

1. Ulotrichaceae. Der Hauptrepräsentant dieser Familie ist die Gattung Ulothrix selber. Rasch fließende Bäche, Brunnen usw. beherbergen diese Algen, auch in Seen und im Meere kommen sie vor, immer aber an Plätzen, wo reichliche Wasserbewegung genügend Luft zuführt. An relativ niedere Temperaturen gebunden, erscheinen die Algen mit besonderer Vorliebe im Frühling und im Herbst.

Viel beschrieben ist Ulothrix zonata; sie bildet unverzweigte Fäden. Die unterste Zelle ist als Haftorgan ausgebildet und greift vielfach mit lappigen Fortsätzen um das Substrat herum. In den zylindrischen Fadenzellen liegt der Chromatophor (Fig. 14) bandförmig an der Peripherie, da er aber erheblich kürzer ist als die Zelle, entsteht die Bänderung, welche der Pflanze den Namen verschafft hat. Als Fortpflanzungsorgane sind bekannt:

1. Makrozoosporen (Fig. 14), welche in jeder Zelle durch sukzessive Zweiteilung entstehen. Sie gleichen den Zoosporen der

Chlamydomonaden derart, daß eine weitere Beschreibung unnötig ist. Die fraglichen Schwärmer werden zu zwei bis acht in jeder Zelle gebildet und treten, zunächst noch in eine Blase eingeschlossen, aus einer seitlichen Oeffnung der Mutterzelle heraus. Die Makrozoosporen haben vier Geißeln,

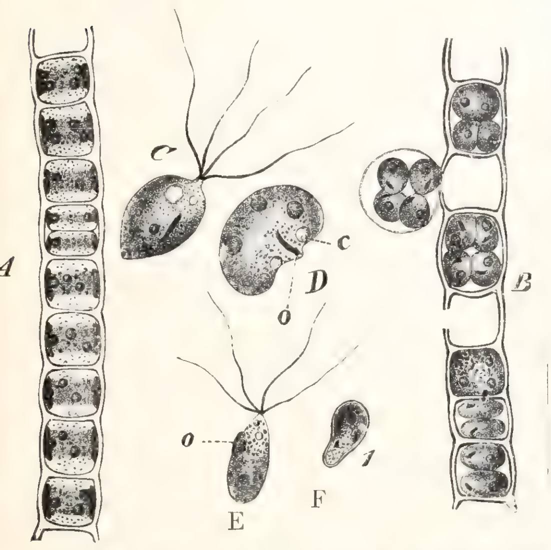


Fig. 14. Ulothrix zonata. A vegetativer Faden, B Zoosporenbildung, C Makrozoospore, D dieselbe, keimend, E Mikrozoospore, F dieselbe, keimend, o Augenfleck, c Vakuole.

bewegen sich mit diesen bis zu 24 Stunden, dann legen sie sich mit einer Flanke dem Substrat an, saugen sich unter Abflachung fest und bilden neue Fäden.

2. Die Mikrozoosporen entstehen wie die Makrozoosporen, sind kleiner und werden demgemäß zahlreicher in einer Zelle gebildet; sie keimen unter Festsetzung mit dem Mundende. Zwischen beiden Schwärmerformen dürften mancherlei Uebergänge vorhanden sein.

3. Die kleineren Zoosporen mögen wieder den Uebergang zu den Gameten bilden. Diese sind alle gleich gestaltet. Zur paarweisen Vereinigung müssen sich Zellen aus verschiedenen Fäden treffen. Die Art der Verschmelzung ist die übliche (Fig. 15), die Form der Zygoten ebenfalls. Die Verschmelzung der Gameten kann künstlich gehemmt werden, z. B. durch Zusatz einer Salzlösung. Dann entstehen unter Abrundung Parthenosporen. Zygoten wie Parthenosporen wachsen direkt zu Fäden aus, indem sie ihre Haut sprengen (Fig. 15).

Sehr bekannt geworden sind die Ulothrixarten deswegen, weil bei ihnen häufig die Zoosporen zwar angelegt, aber nicht voll entwickelt werden. Die Geißelbildung bleibt aus; stattdessen wird eine eigene Membran gebildet, und so erhalten wir unbewegliche Aplanosporen. Diese treten in mannigfachen Modifikationen, oft noch von der verschleimten Wand der Mutterzelle umgeben, auf. Gelegentlich sogar werden sie mit derber Haut umgeben, und stellen dann Hypnosporen dar. Alle diese Gebilde können aber schließlich wieder in den Schwärmerzustand übergehen.

Außerdem bilden die Ulothrixarten unbewegliche Zellen anderer Art; diese entstehen dadurch, daß die Zellwände verquellen, die

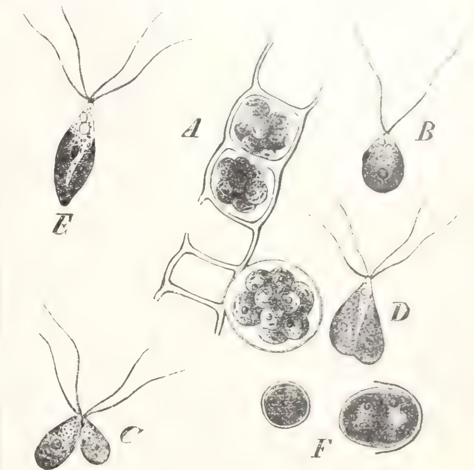


Fig. 15. Ulothrix zonata. A Gametenbildung. B Gamet. C bis E Kopulation. F Zygote oder Parthenospore und deren Keimung.

ursprünglich zylindrischen Gliederzellen aber sich abrunden und dann Teilungen eingehen. Die so entstehenden Haufen grüner, von Gallerte umgebener Zellen führen den Namen Palmellen. Sie wurden früher häufig als eine besondere Algengattung angesehen. Endlich können noch Akineten entstehen. Die Fadenzellen speichern Reservestoffe, erhalten dicke Häute und ruhen zeitweilig, oft unter Zerfall des Fadens.

Als ein primitiverer Vertreter unserer Familie kann noch Hormidium (Stichococcus) betrachtet werden. Er bildet zarte grüne Fäden, welche frei im Wasser treiben. Von Fortpflanzungsorganen sind nur Schwärmer mit Geißeln bekannt. Eine Vermehrung der Fäden kann dadurch erfolgen, daß diese in ihre einzelnen Zellen zerfallen. Jede Zelle gibt wieder einen Faden. Die Alge kommt besonders vor auf Baumrinden, feuchten Steinen (alten Bauwerken), feuchtem Boden usw. Sie tritt in allen möglichen Kulturen nicht selten auf. Erwähnt haben wir sie hauptsächlich deswegen, weil mit ihr vielfach ernährungsphysiologische Versuche angestellt wurden.

2. Ulvaceae. Die Gattung Ulva stellt große grüne Flächen dar, welche bis zu 20 oder gar 30 cm Länge und Breite erreichen können. Die sehr weichen blattartigen Gebilde bewegen sich leicht im Wasser; sie sind in der Jugend mit Hilfe eines verschmälerten Stieles und einer Haftscheibe an das Substrat gekettet, lösen sich später aber mit Vorliebe von ihm los. Die Ulva ist ein charakteristischer Bewohner von Brack- wie auch von unsauberen Küsten- und Hafen-Gewässern — Orten, die von anderen Algen längst gemieden werden.

Das Laub besteht aus zwei Lagen von Zellen, welche fest auf- und aneinander schließen.

Ihnen gegenüber steht die viel zartere Monostroma mit einer Schicht von Zellen, und an diese reiht sich Enteromorpha. Der Thallus derselben stellt darmähnliche Schläuche oder Säcke dar, deren Wand aus einer Zellschicht besteht. Enteromorpha ist in Brackwässern und stagnierenden Süßwässern namentlich in den Küstengebieten sehr häufig.

Fortpflanzung im wesentlichen wie bei Ulothrix. Von dieser Gattung ist auch die Familie herzuleiten, unter der Annahme von Teilungen in mindestens zwei Richtungen.

3. Prasiolaceae. Schizogonium und Prasiola sind zum großen Teil Luftalgen, welche an Baumrinden, unter Dachtraufen und ähnlichen Orten leben.

Schizogonium stellt Fäden aus einer oder mehreren Zellreihen dar. Prasiola ist in der ersten Jugend auch fädig, geht aber früher oder später in breite grüne Flächen über, die einschichtig zu bleiben pflegen. Vermehrung durch losgelöste Thallusstücke, durch Freiwerden der Einzelzellen oder durch unbewegliche Zellen (Aplanosporen), welche in Mehrzahl in einer Zelle entstehen. Chromatophor sternförmig.

4. Cylindrocapsaceae. Cylindrocapsa, die einzige Gattung dieser Familie, ist eine seltene Süßwasseralge. Die unverzweigten Fäden sitzen in der Jugend fest, sie gleichen im Bau wie auch in der Fähigkeit Palmellen, Akineten usw. zu bilden ganz der Ulothrix.

Ungeschlechtliche Fortpflanzung unsicher, geschlechtliche oogam. Durch wiederholte Teilungen der Gliederzellen des Fadens entstehen Spermatozoid-Mutterzellen (spm Fig. 16). Jede derselben liefert zwei Spermatozoiden von Spindelform und eigenartiger Färbung. Zwecks Bildung der Oogonien schwillt eine beliebige Fadenzelle stark auf (Fig. 16), der Inhalt rundet sich unter Kontraktion ab und die Wand erhält durch lokale Verquellung eine Oeffnung. Nun schlüpfen die männlichen Zellchen ein (Fig. 16) und das Resultat ist eine Hypnozygote. Vielleicht greift hier auch Parthenogenesis Platz.

5. Oedogoniaceae. In diese Gruppe gehört Oedogonium mit unverzweigten, Bulbochaete mit verzweigten Fäden und sehr eigenartigen Haarbildungen, endlich Oedocladium, eine kriechende verzweigte Pflanze feuchter Standorte.

Oedogonium stellt den Typus dar. Alle Formen dieser Gattung sind zum mindesten in der Jugend festgewachsen und zwar meistens mit Hilfe von farblosen, lappigkralligen Fortsätzen der basalen Zellen. Die einzelnen Gliederzellen der Fäden zeichnen sich aus durch einen oft sehr zierlichen, netzförmig durchbrochenen Chromatophor, der ziemlich zahlreiche Pyrenoide trägt und der natürlich der Zellwand ringsherum angelagert ist. Im Innern der Zelle findet sich ein großer Zellkern.

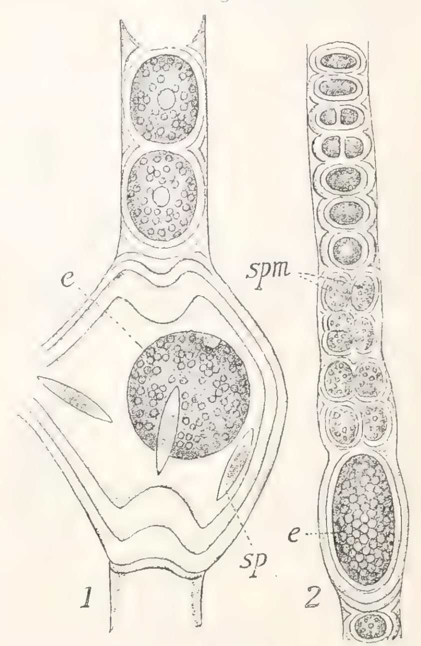


Fig. 16. Cylindrocapsa. 1 Faden mit geöffnetem Oogon. 2 mit Spermatozoid-Mutterzellen und Oogon; e Eizelle; sp Spermatozoiden. spm Spermatozoid-Mutterzelle.

Sehr eigenartig sind bei allen Oedogoniaceen Ringe oder Kappen, welche (Fig. 18, 1) am Oberende zahlreicher Zellen liegen. Schon an ihnen kann man auch die nicht fruktifizierenden Fäden der Oedogonien sofort erkennen. Die Kappen entstehen im engsten Zusammenhang mit den Zellteilungen. Soll eine solche beginnen, so wird am oberen Ende der Zelle auf der Innenseite der Zellwand ein dicker Ringwulst sichtbar (Fig. 17, 1). Dieser reißt später auf und unter Streckung des Ringes wird scheinbar ein neues Wandstück zwischen die Kappe und den unteren Teil eingeschoben (Fig. 17, 3). In Wirklichkeit verläuft die Sache so: Der Ringwulst ri (Fig. 17, 4) wird von der alten Wand aus unter

partieller Verquellung gebildet. Hat er eine gewisse Dicke erreicht, so bildet das Protoplasma der zu teilenden Zelle auf seiner ganzen Oberfläche eine neue, vollkommen zusammenhängende Haut (nh). Diese liegt der alten Zellwand natürlich innen an. Dort wo sie den vorgebildeten Ring überzieht, ist sie mächtiger als an irgend einer anderen Stelle. Ist die neue Haut innen hergestellt, dann quillt der primäre Ring (ri) auf (Fig. 17)

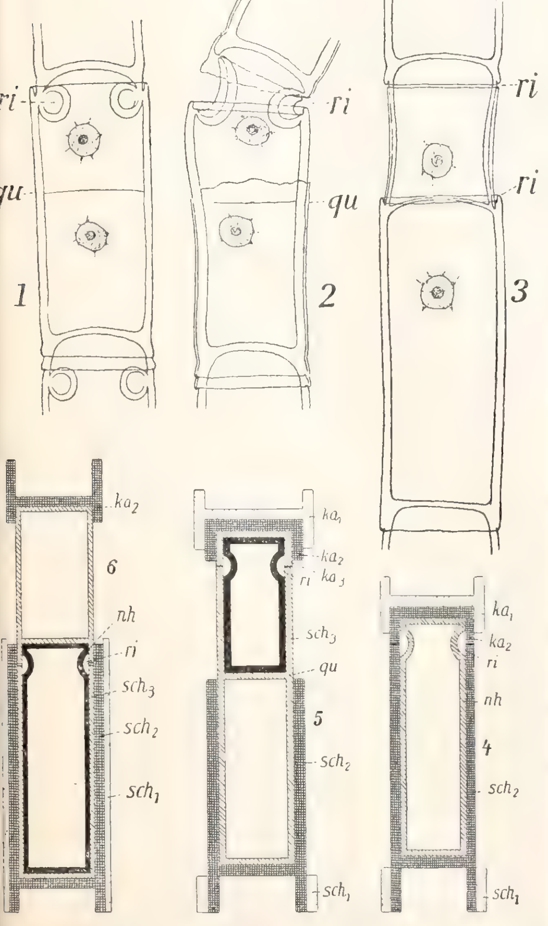


Fig. 17. Zellteilung bei Oedogonium. 1—3 nach der Natur, 4—6 Schemata, 4 und 5 Teilung der Kappenzellen, 6 Teilung einer Scheidenzelle, ri Ring, ka_1 ka_2 usw. Kappen, sch_1 sch_2 usw. Scheiden, qu Querwand.

und trennt ein oberes kürzeres Stück der Zellwand die Kappe (ka Fig. 17) von dem größeren unteren (Scheide) ab. Nun streckt sich der Teil der Wandung, welche den Ring dick überzog, ganz gewaltig und auf diesem Wege werden dann die beiden älteren Teile der Zelle weit auseinander gezogen (Fig. 17). Sie umfassen aber die neue Wand natürlich oben und unten.

Hand in Hand mit der Vergrößerung der wachsenden Zelle geht eine Teilung der Kerne und endlich die Bildung einer Querwand (qu), welche anfänglich in der Mitte der alten Zelle sitzt (Fig. 17), dann aber an die Stelle geschoben wird, wo der Riß entstand (Fig. 17). Es kann sich jede Fadenzelle unter Ringbildung teilen. Wo aber einmal eine Kappe gebildet ist, wiederholt sich dieser Prozeß häufiger und ebenso sind die Teilungen dort häufiger, wo die ältesten Scheiden liegen, wie das aus Figur 17, 6 leicht ersichtlich ist.

Die Fortpflanzung von Oedogonium erfolgt zunächst auf u n g e s c h l e c h t l i c h e m W e g e, dadurch, daß eine einzige große Z o o s p o r e in jeder Zelle gebildet wird. Zu diesem Zweck sammelt sich sehr reichlich farbloses Protoplasma an einer Stelle in der Mitte der Längswand an (Fig. 18). Diese Stelle ist das zukünftige

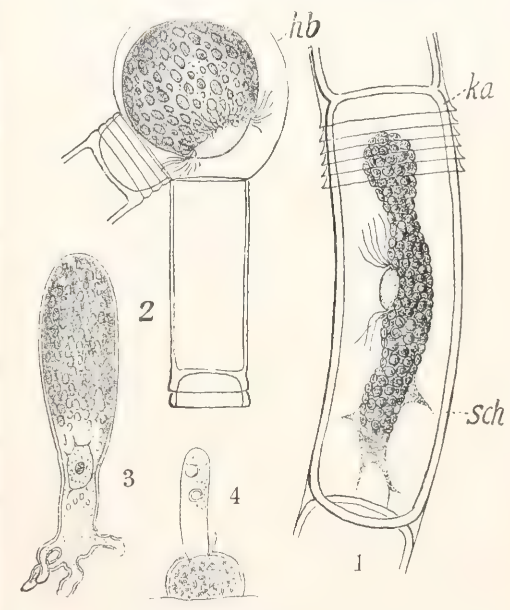


Fig. 18. 1 Zoosporenbildung bei Oedogonium gemelliparum, 2 Zoosporenentleerung bei Oedogonium concatenatum, 3 Keimling von Oedogonium concatenatum, 4 von Oedogonium rufescens, hb Hüllblase, ka Kappe. sch Scheide.

Vorderende der Zoospore, weitmaschige Protoplasmastränge, in welche zahlreiche Chlorophyllkörper eingebettet liegen, bilden das Hinterende, das einstweilen die ganze Zelle füllt. Am Uebergang zwischen beiden Teilen werden schon in der Mutterzelle zahlreiche Geißeln sichtbar (Fig. 18). Die Zoospore wird schließlich (Fig. 18) durch Aufreißen der Mutterzelle unter der jüngsten Kappe frei. In eine Blase eingehüllt, tritt die Zoo-

spore heraus (Fig. 18) und eilt nach Sprengung der ersteren etwas schwerfällig davon. Bei den Bewegungen sieht man dann auch, daß ein roter Augenfleck vorhanden ist. Die Zoosporen keimen sehr bald. Bei vielen Arten setzen sie sich mit dem Mundende fest (Fig. 18), bei anderen mit einer Flanke und bilden einen halbkugeligen Fuß (Fig. 18). aus welchem der neue Faden hervorwächst.

In der geschlechtlichen Fortpflanzung werden Oogonien und Antheridien gebildet. Soll ein O gonium entstehen, so wird zunächst ein Ring und eine neue Innenwand gebildet, genau wie bei einer gewöhnlichen Zellteilung. Wenn aber die Kappe abgesprengt ist, quillt der Inhalt, von der neuen Haut umgeben, bauchig

Fig. 19. 1. Oedogonium ciliatum, ganzes Pflänzchen. 2 Oedogonium Braunii, Bildung des Oogoniums. 3 Oedogonium Boscii, Oeffnung des Oogons. 4 Oedogonium Boscii, Fadenstück mit Antheridien, 5 Spermatozoid von Oedogonium Boscii. 6 Oedogonium Braunii, Fadenstück mit Androsporen. a Antheridium. o Oogonium. st Stützzelle. em Empfängnisfleck. p Schleimpapille.

auf. In den alten Häuten bleibt ein Teil des alten Zellinhaltes stecken und wird durch eine Querwand abgegliedert. Das letztere ist die sogenannte Stützzelle (st Fig. 19), die über ihr liegende angeschwollene Zelle ist das Oogon. In diesem ist ein großer Zellkern zu sehen.

In dem jungen Oogon liegt das Plasma der Wandung vollständig an. Später aber zieht sich das gesamte Plasma zu einem kugeligen oder eiförmigen Körper zusammen (Fig. 19, 3). In der kontrahierten Masse wird, ziemlich weit nach oben gerückt, ein heller, aus körnigem Plasma bestehender Fleck sichtbar. Das ist der Empfängnisfleck, der übrigens schon vorher angedeutet war. Hand in Hand mit diesen Veränderungen geht eine papillenförmige Vorwölbung der Oogonhaut, und die Anlagerung von Zelluloselamellen auf der Innenseite eben jener Vorwölbung. Ist dann der Empfängnisfleck gebildet und damit das Ei formiert, dann verschleimt die Papille mitsamt den unter ihr liegenden Schichten, und so entsteht eine Oeffnung mit zurückgebogenen Rändern (Fig. 19).

Das ist der Oeffnungsmechanismus bei vielen Oedogoniumarten. Bei anderen reißt das Oogon am oberen Rande auf, das obere Ende des Fadens biegt sich knieförmig zurück, und schafft damit, wie auch mit kleinen nebenher gehenden Veränderungen, die Oeffnung für den Eintritt der Spermatozoiden (Fig. 19, 1).

Die Antheridien werden bei einer mäßigen Zahl von Arten unserer Gattung direkt in den normalen Fäden gebildet. Eine oder mehrere längere Fadenzellen werden durch wiederholte Teilungen, die im einzelnen etwas verschieden verlaufen können, in kurze scheibenförmige Stücke zerlegt. Jede Scheibe teilt sich durch eine Längswand in zwei Zellen und aus diesen schlüpfen Spermatozoiden hervor (Fig. 19, 4. 6). Das sind Gebilde, welche in ihren Umrissen, ihrer Bewimperung, wie auch in der Form ihres farblosen Vorderendes den Zoosporen gleichen. Sie sind indessen viel kleiner und fallen vor allen Dingen durch eine Reduktion der Chromatophoren auf; diese sind sehr klein und nicht mehr grün, sondern meist gelblich gefärbt.

Natürlich dringt mindestens ein solches Spermatozoid durch die vorhin beschriebene Oeffnung in das Oogonium ein, vereinigt sich am Empfängnisfleck mit der Eizelle und nun entsteht durch Umhüllung mit derber Haut und durch Aufspeicherung von Reservesubstanz eine Hypnozygote.

Nicht bei allen Oedogonien gestalten sich die Fortpflanzungsverhältnisse so einfach. Vielmehr sind bei ihnen die berühmten Zwergmännchen in den Entwickelungsgang eingeschaltet. Zwecks Bildung derselben entstehen Scheibenzellen, als ob es Spermatozoiden geben sollte. Die Scheibenzellen werden aber nicht längs geteilt, sondern sie lassen ihren Inhalt in toto als sogenannte

Androspore ausschlüpfen. Diese Gebilde sind klein, aber im übrigen kaum anders gebaut, als die Zoosporen; man kann sie wohl als ein Mittelding zwischen diesen und den Spermatozoiden bezeichnen. Die Androsporen setzen sich nun in der Nähe der Oogonien fest, im einfachsten Falle umgeben sie sich mit Membran und bilden dann in der so entstehenden Zelle je zwei Spermatozoiden von der oben geschilderten Form. Bei anderen Arten teilt sich die umhäutete Androspore mehrfach und bildet eine oder einige sterile Zellen, welche dann auf ihrem Scheitel ein Antheridium entwickeln (Fig. 19, 1). Dies besteht aus wenigen, meist zwei Zellen, welche dann ihrerseits Spermatozoiden liefern. Die Befruchtung ist natürlich die gleiche.

Die Keimung der Zygote erfolgt bei allen Oedogoniaceen in gleicher Weise. Der Inhalt schlüpft unter Sprengung der Membran heraus, bildet meist vier Zoosporen und diese verhalten sich wie die aus vegetativen Zellen gebildeten Schwärmer.

Die Oedogoniaceen sind fortgeschrittene Ulothrichaceen; wo sie im einzelnen anzuschließen seien, ist um so schwerer zu sagen, als die Schwärmerform eine etwas abweichende ist. Anzunehmen, daß die ursprünglichen Geißeln an Zahl vermehrt sind, scheint mir keine Schwierigkeiten zu haben.

b) Chaetophoreen-Reihe.

6. Chaetophoraceae. Die Familie führt, wie leicht ersichtlich, ihren Namen von den recht verschiedenartigen Haarbildungen, welche den meisten Vertretern derselben zukommen. Sie ist fast über alle Weltteile verbreitet und findet sich hauptsächlich im Süßwasser, ohne freilich in gewissen Gattungen und Arten das Salzwasser zu meiden. Die Fäden sind reich verzweigt, im übrigen aber in Anpassung an verschiedenartige Lebensweisen sehr mannigfaltig gestaltet. Die Fortpflanzung erfolgt durch Zoosporen und Isogameten. Es handelt sich offenbar um verzweigte Ulothricheen.

Als markanteste Vertreterin unserer Familie hebt sich zunächst die Unterabteilung der Chaetophoreae ab; in dieser ist die Gattung Stigeoclonium wohl die einfachste. Sie bildet zunächst eine sogenannte Sohle (Fig. 20 2), das ist ein Komplex reich verzweigter, dem Substrat fest angeschmiegter Fäden. Von ihnen erheben sich aufrechte oder im Wasser flutende Sprosse (Fig. 20 1), welche reich verzweigt sind. Die Enden der letzten Auszweigungen sind vielfach lang ausgezogen und fast farblos.

Bei der Gattung Chaetophora haben wir wiederum eine Sohle, von welcher sich Fäden erheben, die in ihrem Bau nicht wesentlich von dem des Stigeoclonium abweichen. Jedoch entstehen diese Fäden so massenhaft, daß sie sich zu dichten, meist halbkugeligen Polstern in strahliger Anordnung zusammendrängen. Die Festigkeit der letzteren wird durch mehr oder minder derbe Gallerte, welche die Zwischenräume



Fig. 20. Stigeoclonium. 1 Stigeoclonium tenue Rabh. (schwach vergrößert). 2 Stigeoclonium lubricum, Sohle (asp aufrechte Sprosse). 3 Stigeoclonium protensum, Zoosporenbildung. 4 Zoosporen. 5 Palmellastadien. 6 Aplanosporen.

zwischen den Fäden ausfüllt, wesentlich erhöht. Die Polster können bis zu 1 cm im Durchmesser erreichen, sie sitzen dann meistens anderen Wasserpflanzen auf.

Draparnaldia endlich hat eine langgestreckte Hauptachse, welche sich mehrfach verzweigt. Die Zellen der letzteren sind ziemlich hell, weil der bandförmige Chromatophor in ihnen verhältnismäßig schmal ist. Die Hauptachsen tragen dann reich verzweigte Büschel intensiv grün gefärbter Aeste.

Die Acrochaeteae leben vorzugsweise im Schutze anderer Algen. Wenn diese lose nebeneinander stehende oder leicht verschlungene Fäden bilden, pflegen die Acrochaeten zwischen ihnen hindurch zu kriechen. So schlängelt Acrochaete repens

sich zwischen den Paraphysen von Laminaria hindurch (Fig. 21, 1.).

Die Endodermeae sind einen Schritt weiter gegangen, sie leben in der Zellwand anderer Algen, haben die Fähigkeit die Cuticula abzuheben und sich zwischen diese und die Zellwand einzuzwängen. Das ge-

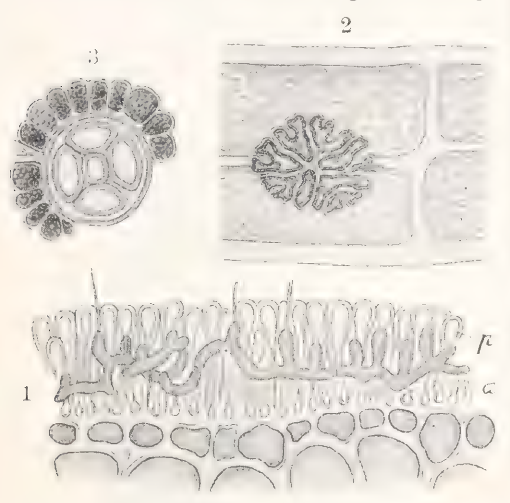


Fig. 21. 1 Acrochaete (a), zwischen den Paraphysen (p) von Laminaria kriechend. 2 und 3 Pringsheimia auf Polysiphonia, 2 junge Scheibe von oben, 3 ältere im Querschnitt.

schieht mit Hilfe von Keimschläuchen und in einer Weise, welche an das Eindringen von Pilzen erinnert (Fig. 22, 2. 3. 4.).

Die Chaetopeltideae endlich bestehen fast nur aus der Sohle, alle aufrechten Fäden sind reduziert und so resultieren schließlich einfache Scheiben, welche sich dem Thallus anderer Algen eng anschmiegen (Fig. 21, 2. 3).

Die ungeschlechtliche Fortpflanzung geschieht durch Makrozoosporen, welche in der Regel mit vier (Fig. 20), bei einigen Gattungen auch nur mit zwei Geißeln versehen sind. Diese keimen direkt. Außerdem gibt es Mikrozoosporen. Sie haben immer vier Geißeln, bilden nach kurzer Zeit Ruhezellen, oder aber sie kopulieren und bilden Dauerzygoten. Das gilt für die bestuntersuchten Formen. In vielen anderen Fällen sind die Dinge noch ziemlich unklar. Indem zumal die Zellen der Sohle (Fig. 20) sich abrunden und ihre Außenwandschichten verschleimen lassen, bilden sich Palmellen wie bei Ulothrix. Aplanosporen entstehen (Fig. 20, 6), indem die Zoosporen unbeweglich bleiben. Sie werden frei durch Membranverschleimung.

7. Pleurococcaceae. Um sie irgendwo unterzubringen, erwähnen wir hier die Gattung Pleurococcus. Unter diesem Namen ging in alter und neuer Zeit ein wahres Chaos von Formen. Viele von ihnen sind mit Recht heute den Chlorellen zugeordnet. Was übrig blieb, ist eine mäßig große Zahl von Arten, die vielfach annähernd

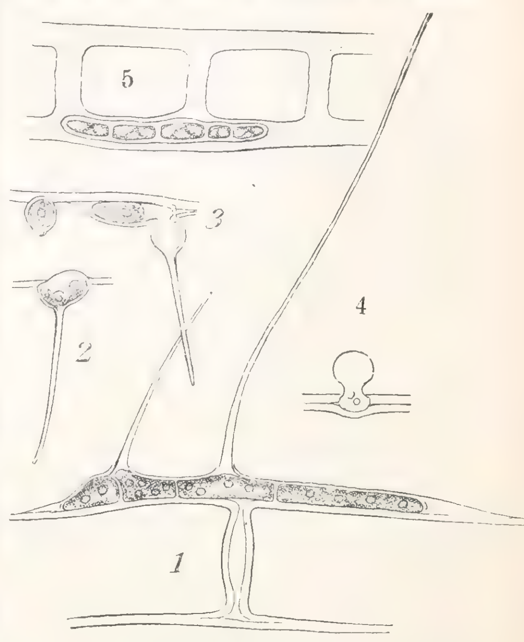


Fig 22. Verschiedene Endoderma-Arten und deren Keimung.

kugelige Zellen darstellen, bisweilen aber auch in wenigzelligen Verbänden (Fig. 23) oder in Fäden (Fig. 23) auftreten. In den ganz normal gebauten Zellen liegt ein Plattenchromatophor der Wand an; gewisse Arten dürften ein Pyrenoid

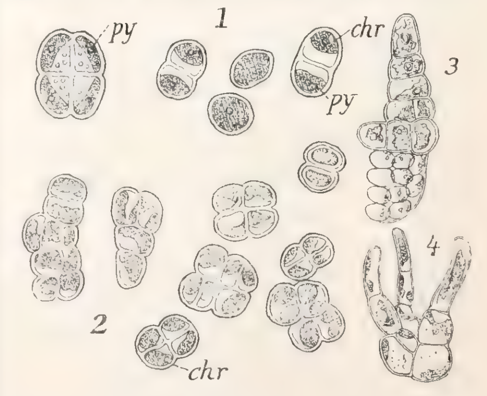


Fig. 23. Pleurococcus. 1 Pleurococcus simplex, 2 Pleurococcus Naegelii, 3 Pleurococcus vulgaris, 4 Pleurococcus Naegelii, fadenbildend, chr Chromatophor, py Pyrenoid.

führen. Die Vermehrung erfolgt massenhaft durch einfache Zweiteilung, oft in zwei aufeinander senkrechten Richtungen. Außerdem wurden von einem Beobachter Zoosporen, Aplanosporen und Gameten nachgewiesen. Die Gattung Pleuro-

coccus repräsentiert größtenteils Luftalgen. Die grüne Färbung der Baumrinden, die Färbung beschatteter Mauerwerke und manches Aehnliche geht zum großen Teil auf Pleurococcaceen zurück, die ihrerseits das Austrocknen für eine gewisse Zeit vertragen können.

8. Aphanochaetaceae. Die Familie ist vertreten durch die Gattung Aphanochaete. Diese bildet auf anderen Algen kriechende Fäden mit den üblichen Haarbildungen. Danach brauchte man sie nicht von der vorhergehenden Familie zu trennen, auch nicht wegen der Zoosporenbildung, welche die übliche ist. Ein scharfer Unterschied aber besteht in der geschlechtlichen Fortpflanzung. Es sind nämlich Oogonien und Antheridien leicht unterscheidbar. Die letzteren sind (a Fig. 24) fast farblose

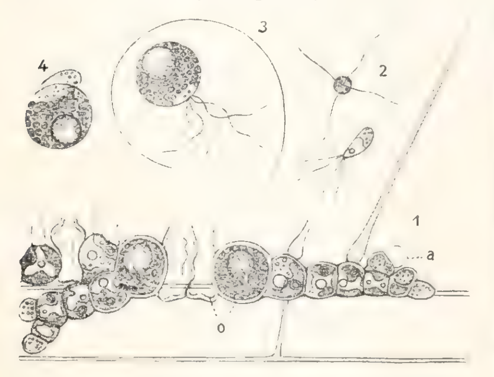


Fig. 24. Aphanochaete repens. 1 Pflänzchen mit Sexualorganen auf einem Algenfaden. 2 Spermatozoiden. 3 Ei nach dem Ausschlüpfen aus dem Oogon. 4 Befruchtung des Eies. a Antheridium. b Oogonium.

Zellen an den Fadenenden, welche kleine blasse Schwärmer mit vier Geißeln entlassen, — die Spermatozoiden. Die Oogonien sind intensiv grün gefärbt (o Fig. 24); aus ihnen tritt ein großer grüner Schwärmer hervor (Fig. 24, 3), der sich mit seinen vier Geißeln kurze Zeit bewegt. Er kommt aber rasch zur Ruhe und wird unter Abrundung zum Ei, welches dann durch die erwähnten männlichen Schwärmer befruchtet wird (Fig. 24, 4). Resultat eine Hypnozygote.

3. Coleochaetaceae. In ihren Vegetationsorganen erinnert auch diese Familie weitgehend an die Chaetophoraceae. Besonders Coleochaete pulvinata hat eine Sohle, von welcher dann zahlreiche verzweigte Fäden abstehen, die durch Gallerte zu einem Polster vereinigt sind. Bei den meisten übrigen Formen sind die aufrechten Fäden reduziert; am meisten bei Coleochaete scutata, welche eine kreisrunde Scheibe darstellt. Chromatophoren und Kerne wie bei Chaetophora. Auffallend ist, daß die langen glashellen Haare an ihrer Basis noch von einer besonderen Gallertscheibe umgeben sind. Diese haben der Pflanze den Namen gegeben.

Ungeschlechtliche Fortpflanzung durch Zoosporen (mit 2 Geißeln aber ohne Augenfleck), welche einzeln in jeder Zelle gebildet werden

Die geschlechtliche Fortpflanzung ist seit Pringsheims grundlegenden Untersuchungen berühmt geworden. Die Antheridien entstehen (Fig. 25, 1) als völlig farblose

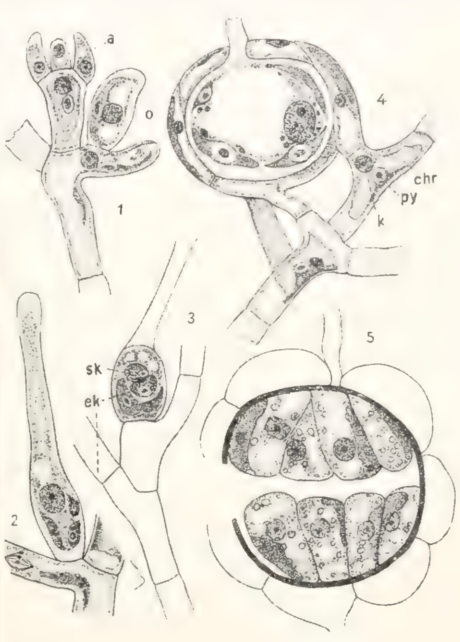


Fig. 25. Coleochaete pulvinata. 1 Antheridienstand und junges Oogon. 2 Oogoinum kurz vor der Oeffnung. 3 dasselbe nach der Oeffnung, oben befruchtet. 4 Zygote, durch Umwachsung zur „Frucht" entwickelt. 5 Keimende Hypnozygote. a Antheridium. o Oogonium. sk Spermakern. ek Eikern. chr Chromatophor. py Pyrenoid. k Kern.

Aussprossungen am Oberende grüner Zellen. Sie entlassen je ein Spermatozoid mit zwei Geißeln. Abgesehen von ihrer Farblosigkeit sehen diese aus wie normale Algenschwärmer. Die Oogonien sind die Endzellen kurzer Zweiglein, die aber durch ihre eigenen Seitensprosse später überholt werden. Anfangs eiförmige Gebilde (Fig. 25, 1) strecken sie sich langsam zu flaschenförmigen Gestalten mit langem Hals. Kern und Chromatophor bleiben an der Basis des Oogoniums liegen, der Hals ist farblos (Fig. 25, 2). Bei der Reife öffnet sich das Oogon an der Spitze, das Plasma ballt sich in seinem Bauch zu einem Ei. Die Spermatozoiden dringen durch den Hals zur Eizelle vor. Befruchtungsvorgang normal (Fig. 25, 3). Die Zygote oder die Oospore

erhält die übliche Haut. Nun aber beginnt ein eigenartiger Prozeß. Gleich nach vollzogener Befruchtung entspringen von den benachbarten grünen Fäden Seitenzweige, wachsen auf die Zygote zu und umspinnen diese vollständig, während sie selber noch erheblich wächst. In der Zygote werden Reservestoffe gespeichert, die Hüllzellen sterben ab, nicht ohne vorher alle der Oospore zugekehrten Häute gebräunt und verholzt zu haben.

Die so entstandene Sporenfrucht (Hypnozygote) ruht über Winter, keimt dann im Frühjahr, und zwar wird sie zunächst durch eine Querwand, dann durch ziemlich zahlreiche Längswände in Zellen zerlegt (Fig. 25, 5). Durch deren Druck wird die Hülle gesprengt, und nun schlüpft aus jeder Zelle ein ziemlich großer Schwärmer, welcher dann einer neuen Pflanze den Ursprung gibt.

10. Chroolepidaceae. Diese Familie ist wohl nicht direkt mit den Coleochaeten verwandt, gehört aber trotz mancher Abweichungen zu den Ulothrichales. Jene sind in erster Linie bedingt durch ihre Lebensweise. Die Chroolepideen sind nämlich Luftalgen. Bei uns bilden sie an feuchten Felsen und Wegböschungen gelbe Pölsterchen, oder treten im Gebirg als braunroter Ueberzug auf Steinen auf, der wegen seines Wohlgeruches den Namen Veilchenstein erhalten hat. Viel massenhafter sind die Chroolepideen in den Tropen vorhanden; dort leben sie mit besonderer Vorliebe auf den derben Blättern im Regenwalde, und rufen vielfach ganz auffallende Zeichnungen an diesen hervor, so auffallend, daß manche dort lebende Tiere entsprechende Zeichnungen angenommen haben.

Auch bei den Chroolepideen haben wir vollständige Parallelreihen zu den Chaetophoreen. Die europäische Trentepholia aurea mit ihren nächsten Verwandten betrachten wir als Typus. Sie hat die übliche Sohle und verzweigte aufrechte Fäden (Fig. 26, 5). Zu glatten, einschichtigen Scheiben mit wenigen aufrechten Aesten ist die meist tropische Phycopeltis reduziert. Mehrschichtige Scheiben, welche auch Fortsätze in die Wirtspflanze entsenden, aber auch fruchttragende Aeste über das Substrat hervortreten lassen, bildet endlich der ebenfalls tropische Cephaleuros.

Der Zellenbau bei unserer Gruppe erinnert in vieler Beziehung an den der vorigen Familien, aber in zwei Punkten sind Unterschiede: Die Zellen werden im Alter meist mehrkernig, und außerdem enthalten dieselben einen ölartigen, gelben bis gelbroten Körper, der in Tropfenform auftritt: das Hämatrochrom. Dieses dürfte ein Schutzkörper gegen intensive Besonnung sein; denn er tritt bei hellem Licht reichlich auf, schwindet aber bei Beschattung.

Die ungeschlechtliche Vermehrung ist in augenfälliger Weise dem Luftleben angepaßt, wie die des Pilzes Peronospora. Die Zoosporangien erheben sich auf kurzen, oft scharf gekrümmten Stielen (daher Hakensporangien) über das Substrat (Fig. 26). Oft mit einem seitlichen Schnabel usw. versehen, werden sie in toto mit Hilfe eines besonders geformten Ringes (Fig. 26) abgestoßen. Das erfolgt bei Trockenheit, der Wind treibt sie fort. Bei Regen oder anderer Benetzung treten die Zoosporen in kürzester Frist aus und setzen sich in Vertiefungen aller Art fest, um zu keimen.

Die Gametangien nannte man früher Kugelsporangien. Die ziemlich stark aufgeschwollenen Zellen sitzen am Ende der freien Fäden (Fig. 26),

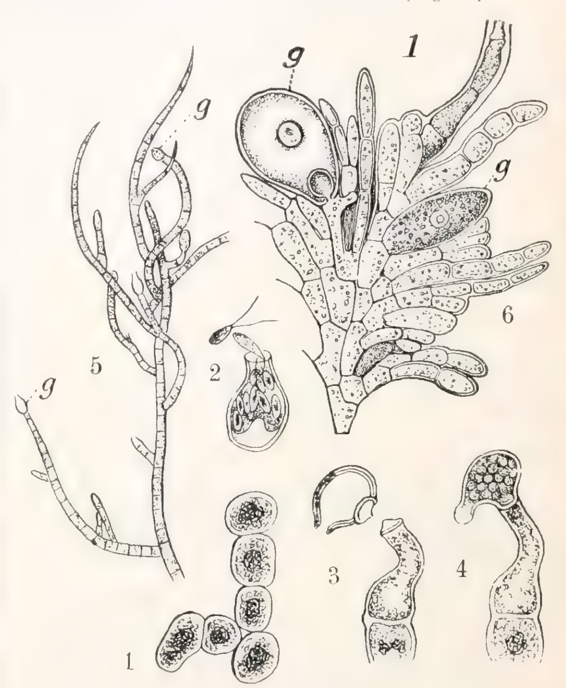


Fig. 26. 1—4 Trentepholia umbrina. 1 Fäden in Einzelzellen aufgelöst, 2 eine Zelle in ein Gametangium verwandelt, 3, 4 Sporangien, 5 Trentepohlia aurea, Sproß mit Gametangien (g), 6 Cephaleuros mit Gametangien (g).

oder sie erscheinen in die Scheiben eingesenkt (Fig. 26), auch hier allerdings das Ende einer Fadenreihe bildend, oder bilden sich aus beliebigen Zellen, wenn eine Auflösung in Einzelzellen stattgefunden hat (Fig. 26, 2). Bei Benetzung treten aus den fraglichen Zellen in 5 bis 10 Minuten Schwärmer aus, die offenbar vorgebildet sind. Ihre Verschmelzung wurde mehrfach angegeben, ihre direkte Keimung aber auch wiederholt beobachtet. Es sind nicht alle Zweifel behoben.

d) Siphonocladiales. Der in der Regel reich verzweigte Thallus besteht aus großen, stets vielkernigen Zellen. Der Chromatophor ist netzig oder in zahlreiche Plättchen aufgelöst. Ableitung von den Ulothrichales unter der Annahme, daß die Zellen vergrößert wurden und deshalb mit mehreren Kernen ausgestattet werden mußten.

Die Anfangsglieder der Reihen sind isogam, die höheren oogam.

a) Isogame Siphonocladialen.

1. Cladophoraceae. Die einfachste Gattung ist Chaetomorpha aus dem Brackwasser. Die dick borstenförmigen und völlig unverzweigten Fäden sitzen, zum mindesten in der Jugend, mit dem üblichen Haftorgane (Fig. 27) fest. Die oft tonnenförmigen und recht großen Gliederzellen des Fadens haben einen Netzchromatophor (Fig. 27, 3) mit vielen Pyrenoiden. Die Kerne liegen in einer besonderen Plasmaschicht auf der Innenseite der Chromatophoren. Die Verlängerung der Fäden geschieht durch Teilung beliebiger Zellen.

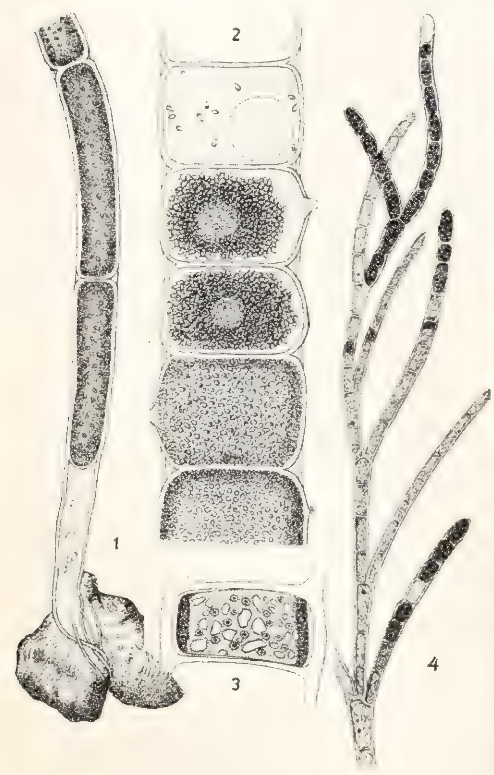


Fig. 27. 1 Chaetomorpha aerea, Basalteil einer jungen Pflanze, 2 dieselbe, Stück eines Zoosporen bildenden Fadens, 3 Zelle von Urospora mit Netzchromatophor. 4 Zweig einer Cladophora mit Sporangien.

Große Büschel reich verzweigter Fäden, die im strömenden Süßwasser, oder auch in der Brandung fluten, bildet Cladophora (Fig. 27, 4). Anheftung durch eine Sohle, weitere Verankerung eventuell durch helle Fäden (Hyphen), welche an den Sprossen entspringen und gegen das Substrat hinwachsen. Die grünen Fäden wachsen durch Teilungen in den Endzellen, die als Scheitelzellen fungieren, interkalare Teilungen sind aber nicht immer ganz ausgeschlossen. Verzweigung durch Vorwölbung einer Warze am Oberende einer Gliederzelle, dann Abgliederung dieser durch eine Querwand. Zellbau wie bei Chaetomorpha. Zellteilungen werden eingeleitet durch mitotische Vermehrung der Kerne. Dann entsteht in der Mitte der Zelle ein Zellulosering, welcher sich nach innen immer mehr verbreitert und irisähnlich das Plasma durchschnürt.

Mikrodiktyon, Anadymone u. a. verzweigen sich vorzugsweise in einer Ebene und verketten dann ihre Zweige zu Netzen, Flächen usw.

Zoosporen (meist mit vier Wimpern), wurden bei den wichtigsten Gattungen gefunden, bei Chaetomorpha kann jede Zelle zum Sporangium werden (Fig. 27, 2), bei Cladophora kommt diese Fähigkeit vorzugsweise den Fadenenden zu (Fig. 27, 4).

Isogameten mit zwei Geißeln mehrfach als normal funktionierend beschrieben.

Akineten. Einzelne Gliederzellen, aber auch Gruppen von Zellen aus der Sohle, den Hyphen usw. können Reservestoffe speichern und dicke Häute bilden. Da diese Gebilde dem Substrat fest anzuliegen pflegen, möchte man fast von Rhizomen reden, mit deren Hilfe nicht wenige Cladophoren den Winter überstehen. Eine besondere Art der Akinetenbildung hat die, von Cladophora kaum zu trennende Pitophora. Das Plasma rückt mit Reservestoffen usw. in das eine Ende der langen Gliederzellen und wird dort abgekapselt.

Berühmt sind die „Seeknödel", Ballen von Cladophoraästen, welche durch die Wasserbewegung gewisser flacher Seen zu Kugeln gerollt werden.

2. Siphonocladiaceae. Den Typus dieser Gruppe bildet die Gattung Siphonocladus, eine Alge des Mittelmeers. Diese bildet in der Jugend einen Schlauch von 1 mm Dicke und 2 bis 3 cm Länge, welcher mit einem reich verzweigten System von Rhizoiden am Substrat festsitzt. Erst sehr spät wird der aufrechte Sproß (Fig. 28, 1) durch mehrere Querwände in eine große Endzelle und in mehrere Gliederzellen zerlegt. Außerdem aber entstehen schräge Wände, von denen manche uhrglasförmig gebogen, linsenähnliche Zellen an der Peripherie der ursprünglichen Sproßzelle herausschälen. Alle diese Zellen können dann zu sehr langen Zweigen auswachsen, die aber nicht durch Querwände abgegliedert werden.

In dieselbe Familie gehört neben einigen anderen Gattungen die Struvea. Junge Pflanzen dieser australischen und amerikanischen Meeresalge stellen zunächst einfache Keulen dar. Später aber wird auf deren Scheitel ein federartiges Gebilde entwickelt, welches durch die sehr regelmäßig fiederig verzweigten Seitenäste entsteht. Diese

werden noch durch besondere Haftorgane aneinander verankert. Für Siphonocladus sind Zoosporen beschrieben, sonst nichts.

3. **Valoniaceae.** Die Gattung Valonia ist allbekannt wegen der großen 1 cm und mehr im Durchmesser haltenden grünen Blasen, die uns das Schleppnetz aus dem Grunde wärmerer Meere heraufbefördert; diese Blasen sind meistens sehr unregelmäßig miteinander verkettet. Ihren Zusammenhang ergibt die vielleicht ein wenig schematisierte Figur 28, 2. Wir haben eine große etwas langgestreckte Primärblase vor uns, diese hat an den verschiedensten Stellen durch uhrglasförmige Wände Zellen

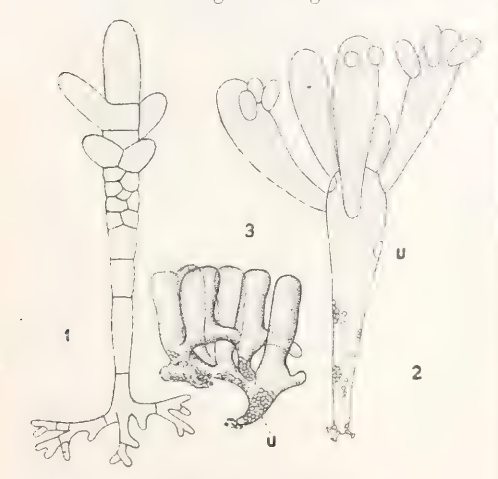


Fig. 28. 1 Siphonocladus pusillus, 2 Valonia utricularis, u „Uhrglaszellen", 3 dieselbe, Brandungsform.

abgegliedert, welche wie Linsen an der Innenseite der Blasenwandung kleben. Am Oberende der Hauptblase ist eine Anzahl Uhrglaszellen wiederum zu aufgetriebenen Schläuchen ausgewachsen, und an diesen kann sich eventuell dasselbe Spiel noch einmal wiederholen. In der Mitte des primären Schlauches ruhen die Linsenzellen in der Regel. An der Basis wachsen sie zu Haftorganen aus, die in der gleichen Weise sich mehrfach verzweigen können und natürlich die Pflanze am Substrat festheften. In ähnlicher Weise wachsen alle Valonien, nur ist die äußere Ausbildung vielfach recht verschieden; wie z. B. Figur 28, 3 zeigt, welche eine Brandungsform von Valonia utricularis darstellt.

Die einzelnen Blasen enthalten in einer einzigen großen Vakuole riesige Zellsaftmengen. Der plasmatische Wandbelag enthält ganz nahe an der Wand zahlreiche scheibenförmige Chromatophoren, von denen einige größer sind und ein Pyrenoid führen. Aeußerst zahlreiche, kleine Kerne liegen innerhalb der Chromatophorenschicht.

Von Fortpflanzungsorganen sind nur Zoosporen bekannt. Zur Bildung derselben wird das ganze Protoplasma einer Blase aufgeteilt. Die Zoosporen schlüpfen dann durch zahlreiche Oeffnungen in der Haut heraus. Sie haben vier Geißeln, mehrere Chromatophoren und einen Augenfleck.

Siphonocladiaceen und Valoniaceen können als Cladophoren betrachtet werden, bei welchen einzelne Zellen auf Kosten anderer fast ins Ungemessene vergrößert sind.

4. **Dasycladaceae.** Diese in wärmeren Meeren lebende Familie ist ausgezeichnet durch eine große, ungegliederte Stammzelle, welche zahlreiche, meist vielzellige Wirteläste trägt. Den Typus repräsentiert Dasycladus. Die ungefähr kleinfingerlangen, ½ cm im Durchmesser haltenden Pflänzchen (Fig. 29) stehen scharenweis auf Gestein u. ä. beisammen. Natürlich werden sie durch Hafter auf diesem festgehalten. Die vertikale Hauptachse hat eine sehr derbe Membran, ist außen sogar verkalkt. In Wirteln übereinander gestellte

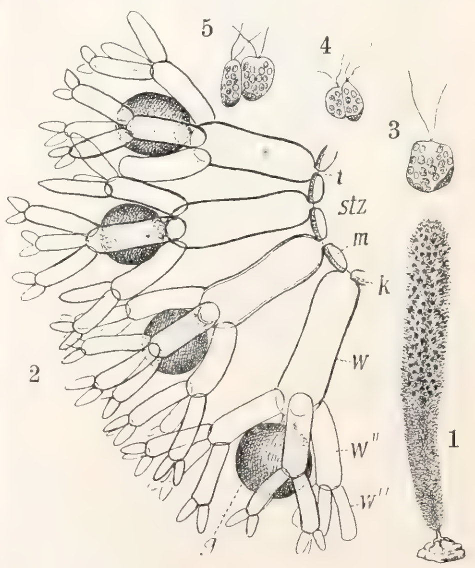


Fig. 29. Dasycladus clavaeformis. 1 fertile Pflanze (natürliche Größe), 2 Stück eines Zweigwirtels, stz Stammzelle, m Haut derselben, w, w'', w''' Wirteläste verschiedener Ordnung, g Gametangium, 3 Gamet, 4 5 Kopulation.

Tüpfelkanäle t durchsetzen sie, und vor jedem solchen Tüpfel ist dann ein Wirtelast inseriert (Fig. 29). Letztere 10 bis 15 an Zahl. Jeder Wirtelast verzweigt sich wiederum wirtelig. Während der Hauptstamm keine Querwände aufweist, sind alle Aeste durch solche voneinander abgegliedert. Zur geschlechtlicher Fortpflanzung werden in der oberen Hälfte oder in den oberen ²/₃ der

Pflanze tiefgrün gefärbte Gametangien gebildet. Diese entstehen als terminale Anschwellungen der primären Wirteläste (g Fig. 29). Fast alles Material aus der Pflanze wandert in sie ein. Die normal gebildeten Gameten werden aus allen Gametangien eines Individuums gleichzeitig entleert. Es kopulieren nur Abkömmlinge verschiedener Individuen. Gameten abgeflacht, vorn sehr breit. Im übrigen Isogamie (Fig. 29, 4. 5). Zygoten keimen sofort. Zoosporen unbekannt, wohl auch unnötig wegen der massenhaft gebildeten Gameten.

An Dasycladus schließen u. a. Neomeris und Cymopolia. Im Prinzip wie jene gebaut, zeichnen sie sich durch ein dichtes Zusammenschließen der blasig aufgeschwollenen Wirteläste 2. Ordnung aus, welche danach die sogenannte Fazettenrinde bilden. Außerdem tritt Verkalkung ganz bestimmter Partien zwischen den Wirtelästen ein (vgl. die spezielle Literatur).

Botryophora stellt sodann das Anfangsglied der Bornetellenreihe dar. Gebaut wie Dasycladus, unterscheidet sie sich scharf durch die nicht terminal, sondern seitlich an den Wirtelästen inserierten Gametangien. Bornetella hat (Fig. 30) eine etwas aufgeschwollene Hauptachse (a), die Wirteläste 1. Ordnung (zw') sind dünn, die zweite Ordnung schwellen blasig auf und schließen zu einer Facettenrinde (f) dicht zusammen. Eine bestimmte Zone (kr) der Facetten verkalkt. Die wiederum seitlich inserierten Gametangien (sp) bilden Cysten (Fig. 30), wie sie uns noch bei den Acetabularien beschäftigen werden.

Fig. 30. Bornetella. 1 ganze Pflanze teils von aussen, teils von innen gesehen a Achse, zw' Zweige 1. Ordnung, f Facetten, kr Kalkring, sp sogenanntes Sporangium, 2 Facetten isoliert, 3 Sporangium oder Gametangium.

Aus diesen Gruppen sind fossile Formen — die Kalkinkrustationen erleichtern ja die Konservierung — mehrfach bekannt. Etwas abweichend ist die nur fossile Triploporella, die ihre Gameten in den aufgetriebenen Wirtelästen erster Ordnung entwickelt.

Die merkwürdigste Alge dieses Verwandtschaftskreises ist aber unstreitig die Acetabularia („Ombrelli" der Neapler Fischer). Auf langem Stiel erhebt sich ein strahliger Schirm. Die Schirmstrahlen sind als Gametangien anzusprechen, sie bilden aber nicht direkt Gameten, sondern es ballt sich das Plasma zu Cysten, welche von einer sehr derben Haut umgeben werden. Cysten zahlreich in jedem Schirmstrahl (Fig. 31, 4). Die Cysten enthalten viele Kerne, Chromatophoren usw. und werden durch Zerbrechen des Schirmes frei. Das erfolgt im Mittelmeer im Juli bis August. Ruhe bis zum Februar bis März. Dann entstehen in jeder Cyste zahlreiche Gameten und werden frei unter Absprengung eines vorgebildeten Deckels (Fig. 31, 5. 6). Isogameten. Zygote keimt alsbald.

Die Acetabularia erscheint in ihrer eben geschilderten Ausbildung fast paradox. Formen wie Halicoryne, Polyphysa u. a., über welche die besondere Literatur nachzusehen wäre, vermitteln indes schon den Uebergang von den vertizillierten Formen, welche wir eingangs erwähnten. Die Ontogenie aber gibt nicht minder guten Aufschluß. Nicht bloß bei Acetabularia, sondern auch bei anderen Vertretern unserer Familie keimen die Zygoten mit einem aufrechten grünen Faden, dieser aber sendet sehr bald farblose Fortsätze in das Substrat. Das sind die sogenannten Basalblasen. Anfangs einfach, werden sie später zu lappig verzweigten Gebilden (Fig. 31, 1), welche sich mit Reservestoffen füllen. Während das geschieht, hat sich der oberirdische Faden verzweigt. Weiter aber kommt die Pflanze im ersten Jahre nicht. Die grünen Teile sterben ab, die Basalblasen perennieren. In der folgenden Vegetationsperiode bildet Acetabularia dann zunächst (Fig. 31, 2) grüne Wirteläste, aber zwischen diesen erscheint auch bald die erste Anlage eines Schirmes (Fig. 31, 2). Dieser, oder die Gametangien, stellen genau genommen seitliche Bildungen von Wirtelästen dar, welche nachher in eine horizontale Lage einrückten. Partielle Reste der Wirtel sind Wülste (coronae ci, cs Fig. 31, 3), welche an der Schirmbasis auftreten. Im übrigen vgl. die Handbücher.

Die Dasycladaceae sind wohl wirtelig verzweigte Siphonocladiaceen.

b) Oogame Siphonocladialen.

5. **Sphaeropleaceae.** Sphaeroplea annulina taucht gelegentlich in Tümpeln usw. auf. Ihr berühmtester Standort ist der Auersbergbrunnen in Graz. Die völlig unverzweigten Fäden haben niemals Haftorgane. Die Alge schwimmt immer frei. Die Pflanze erhielt den Namen annulina, weil in den langen zylindrischen Zellen der Fäden helle und dunkle Querbänder miteinander wechseln. Die hellen Zonen enthalten nur Protoplasma, die dunkeln führen mehrere Kerne und die eckig-plattenförmigen Chromatophoren, von denen die größeren ein Pyrenoid besitzen.

Nur geschlechtliche Fortpflanzung ist beobachtet. Die Spermatozoidbildung beginnt mit einer vielfach wiederholten Kernteilung in den breiten Plasmabändern. Auch die Chromatophoren werden aufgeteilt zu kleinen gelblichen Plättchen. Um je ein solches und um einen Kern gruppiert sich dann das Plasma und gestaltet das Ganze zur männlichen Zelle. Von diesen können in jedem Querband etwa 300 gebildet werden. Sie treten (Fig. 32) durch seitliche Oeffnungen in der Haut aus und lassen dann zwei Geißeln erkennen.

Die Eier werden durch einen eigenartigen Prozeß aus den dunklen Querbändern herausgeschnitten. Sie liegen in größerer Zahl in jeder Fadenzelle und lassen (Fig. 32) einen Empfängnisfleck erkennen. Die Spermatozoiden treten durch eine Oeffnung in der Längswand in die Gliederzellen ein und gelangen so zum Ei. Eine Abweichung von dem Ueblichen ist insofern gegeben, als im Ei sich vielfach mehrere Kerne finden. Doch verschmilzt nur immer ein Spermakern mit einem Eikern, die übrigen gehen verloren.

Die Zygoten bilden bei der Keimung ziemlich viele zweiwimperige Schwärmer, welche vorn rot, hinten grün gefärbt sind. Diese wachsen dann zunächst zu mehrkerni-

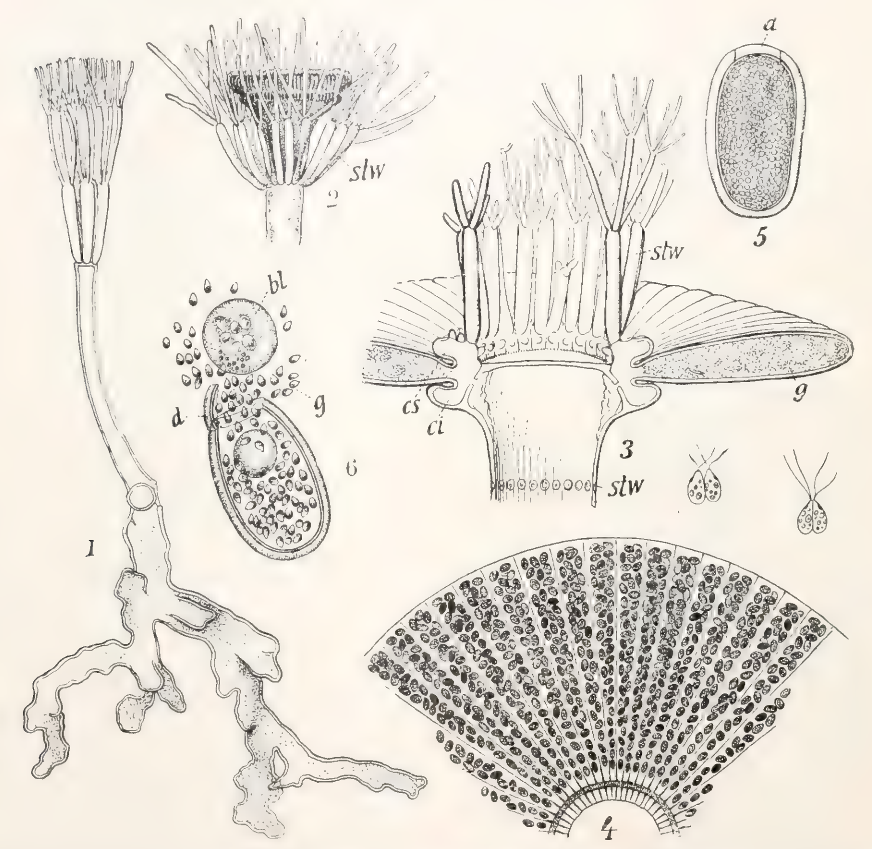


Fig. 31. Acetabularia. 1 Keimpflanze, 2 jugendlicher Schirm, 3 Schema des Sproßaufbaues, cs Corona superior, ci Corona inferior, g Gametangien, stw sterile Wirtel, 4 Schirm von der Fläche, mit Cysten, 5 Cyste geschlossen, 6 Cyste geöffnet, d Deckel, g Gameten, bl Blase.

gen Spindeln aus und diese gehen wieder in die langen Fäden über.

S p h a e r o p l e a kann als eine oogame Chaetomorpha angesprochen werden.

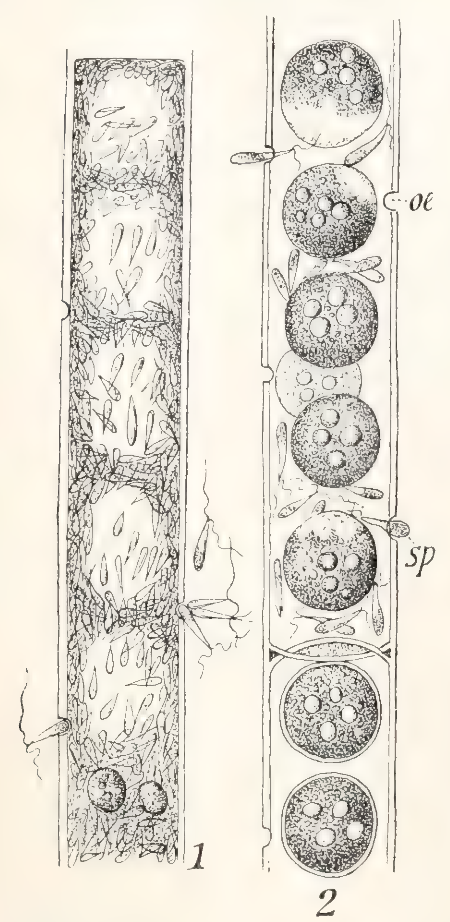


Fig. 32. Sphaeroplea annulina. 1 Spermatozoidbildung, 2 Eizellen von Spermatozoiden (sp) umgeben. oe Oeffnung.

e) Siphonales. Der Thallus ist vielfach fädig und reich verzweigt, nimmt aber in gewissen Gruppen andere, ganz abweichende Formen an. Das allgemeine Kennzeichen der Siphonales ist das Fehlen von Querwänden. So resultieren große Zellen, oder, besser ausgedrückt, nicht zelluläre Pflanzen. Wie üblich haben diese einen protoplasmatischen Wandbelag, welcher außen linsen- oder plattenförmige Chromatophoren besitzt, etwas weiter nach innen aber außerordentlich zahlreiche Kerne führt. Ich nehme an, daß die Siphonales aus den Siphonocladiales entstanden, durch allmählichen Wegfall der Querwände. Das vereinzelte Auftreten derselben (s. unten) ist ein Rückschlag.

1. Codiaceae. Diese Familie lebt nur in Meeren und zwar in den wärmeren. Die reich verzweigten Fäden werden in sehr merkwürdiger Weise zu großen Thallomen von verschiedener Art kombiniert. Eine der einfachsten Formen ist A u r a i n v i l l e a. Der untere Teil der Pflanze, der im Schlamm steckt, stellt einen fast rübenförmigen Körper dar, welcher aus dicht verfilzten Fäden besteht. Der obere Teil gleicht einem Pinsel, welcher aus zahlreichen, im Wasser locker flutenden Fäden aufgebaut wird. Das Ganze kann eine Größe von 10 cm und noch mehr erreichen.

U d o t e a (Fig. 33) tritt uns in Form von gestielten Flächen entgegen, die, wie Laminaria, ein Blatt imitieren, nur sind dieselben weit kleiner (5 bis 15 cm hoch). Die Stiele resultieren aus einer Verflechtung von grünen Fäden. Die Flächen entstehen



Fig. 33. U d o t e a D e s f o n t a i n e i. 1 ganze Pflanze, 2 Stück vom Sproßrande. Längsfäden mit jungen Aesten (Querfäden).

dadurch, daß sich zahlreiche Längsfäden in einer Ebene parallel nebeneinander legen; diese werden dann durch Querzweige verkettet, welche über sie hinwachsen und sich durch lappige Fortsätze ineinanderkeilen (Fig. 33).

C o d i u m bildet grüne, sehr biegsame, verzweigte Sprosse, welche bis zu 30 cm lang und fingerdick werden. Auch kommen Kugelformen von fast Faustgröße vor. Alle diese Formen entstehen ebenfalls durch Verflechtung von Fäden. In der Mitte der fraglichen Körper ziehen dünne, schwach-

gefärbte Fäden ungefähr der Längsrichtung des Ganzen parallel, werden aber auch von schräg und quer verlaufenden durchsetzt. Nach außen hin entsenden jene dünnen Fäden Seitenzweige, welche zu großen Blasen (Rindenschläuchen) anschwellen. Diese sind intensiv dunkel gefärbt, pressen sich gegenseitig aneinander und stellen so eine Fazettenrinde dar, welche mit dem Palisadenparenchym der höheren Pflanzen verglichen werden kann und auch zweifellos wie dieses funktioniert. Figur 34 gibt eine ungefähre Vorstellung davon.

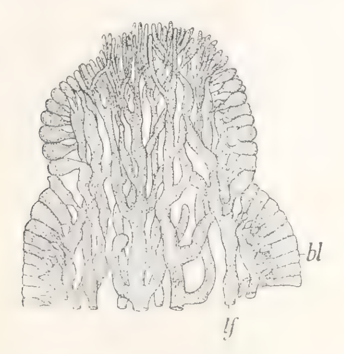


Fig. 34. Pseudocodium de Vriesei. Längsschnitt durch den Scheitel. lf Längsfäden. bl Rindenblasen.

Halimeda (Fig. 35) besteht aus einer Anzahl abgeflachter Glieder, welche ungefähr so wie die Sproßketten der Opuntia aneinander gereiht sind. Die einzelnen Glieder sind infolge von Kalkeinlagerung hart. Diese unterbleibt aber in den Einschnürungen, und deswegen können sich die einzelnen Glieder gegeneinander sehr wohl bewegen. Der Bau ist im wesentlichen derselbe wie bei Codium; der eben erwähnte Kalk liegt zwischen den einzelnen Blasen.



Fig. 35. Halimeda Tuna. Etwas verkleinert.

Fortpflanzung vielfach unzureichend bekannt. Bei Halimeda brechen blasige Sporangien, welche zu vielen auf einem gemeinsamen Stiele vereinigt sind, an den Rändern der Glieder hervor und produzieren zahlreiche Schwärmer, deren Schicksal nicht genügend bekannt ist. Nur über Codium ist man vollständig orientiert. Zum Zweck der Fortpflanzung werden an den Blasen seitliche Ausstülpungen gebildet, welche ungefähr Eiform erhalten und an ihrer Basis durch eigenartige Querwände abgegliedert werden (Fig. 36). Das sind die Gametangien. Aus einem Teil derselben entstehen große weibliche Schwärmer, aus einem anderen kleine männliche. Beide treten unter Quellung der Gametangienmembran an der Spitze aus. Die weiblichen Gameten sind intensiv grün gefärbt, die männlichen sehr hell, fast gelblich. Kopulation durch Vereinigung zweier ungleichartiger Gameten (Fig. 36, 2). Die entstehende Zygote keimt sehr rasch, bildet einen oder einige aufrechte Fäden, von welchen dann seitwärts andere entspringen, die schon wieder die charakteristischen grünen Rindenblasen erzeugen.

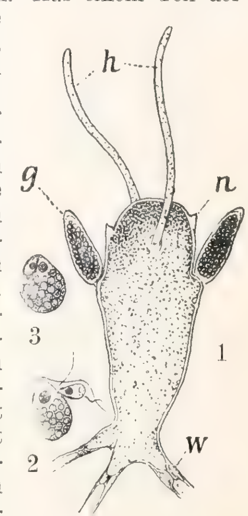


Fig. 36. Codium. 1 Rindenschlauch mit Haaren (h), deren Narben (n) und Gametangien (g). 2, 3 Kopulation der Gameten.

2. Bryopsidaceae. Den Typus dieser Familie bildet die besonders in wärmeren Meeren vorkommende Gattung Bryopsis. Von kriechenden, rhizomähnlichen Fäden erheben sich vertikale Achsen, welche sich wiederholt und sehr regelmäßig fiederig verzweigen. So resultieren dann Bilder wie Figur 37, welche eines der letzten Fiederzweiglein wiedergibt.

Die Vermehrung erfolgt ausschließlich durch Gameten. Diese werden in den jeweils ältesten Fiederästen gebildet. Das Protoplasma wird langsam zerschnitten, und kurz vor Fertigstellung der Gameten werden sehr eigenartig netzige Anordnungen desselben wahrgenommen. Die fertilen Fiedern werden durch eine Iriswand von der Hauptachse abgegliedert, nach ihrer Entleerung fallen sie ab. Die Gameten sind ungleich. Schon die verschiedenartigen Gametangien sind an ihrer Färbung leicht erkennbar; die männlichen sind gelblich und besitzen einen roten Zellsaft in der Vakuole, die weiblichen sind grün. Nach der Entleerung vereinigen sich männliche und weibliche Schwärmer (Fig. 37). Die Zygoten keimen direkt aus. Ungeschlechtliche Fortpflanzung ist nicht bekannt.

3. Caulerpaceae. Die Caulerpen sind am reichsten entwickelt in tropischen Meeren. Am weitesten nach Norden bis ins Mittelmeer usw. vorgeschoben ist Cau-

lerpa prolifera, und diese hat auch immer die Basis für Untersuchungen über die Caulerpen abgegeben. Ein farbloser Stamm kriecht durch den sandigen oder muddigen Meeresboden. Er entsendet nach unten farblose Rhizoiden, nach oben erheben sich von ihm grüne Flächen, die man für gewöhnlich als Blätter bezeichnet. Diese entstehen akropetal am Vegetationspunkt. Sie können, zumal auf ihrer breiten Fläche, mancherlei Sprossungen treiben (Fig. 38). Die einzelnen Arten der Gattung sind sehr mannigfaltig gestaltet, und die erwähnte Caulerpa prolifera stellt nur eine Form unter vielen dar. Sie sind eben teils an das Leben in der Brandung, teils an das in der Tiefe angepaßt. Wir müssen uns hier mit der Darstellung der Caulerpa prolifera begnügen und konstatieren, daß im Wurzelstock von der geschichteten Zellulosewandung nach innen hin Balken ausgehen, welche den ganzen Hohlraum der Zelle unter vielfachem Anastomosieren durchsetzen. Eben solche Zellulosebalken finden sich in den sogenannten Blättern; sie durchsetzen das Innere derselben unregelmäßig von einer Fläche zur anderen. Offenbar haben alle diese Bildungen den Sinn, der Zelle eine gewisse Form zu wahren.

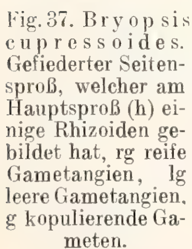


Fig. 37. Bryopsis cupressoides. Gefiederter Seitensproß, welcher am Hauptsproß (h) einige Rhizoiden gebildet hat, rg reife Gametangien, lg leere Gametangien, g kopulierende Gameten.

Alle diese Balken usw. überzieht das Protoplasma. Dasselbe ist in eigenartigen Strängen angeordnet und in diesen finden mannigfaltige Strömungen statt. Von diesen werden die Kerne und gelegentlich auch die Chromatophoren mitgerissen, obgleich diese letzteren mit Vorliebe in einer dünnen Schicht der Wand fest anliegen.

Jedes losgerissene Stück einer Caulerpa kann glatt zu einer neuen Pflanze auswachsen. Das ist alles, was man von ihrer Fortpflanzung weiß. Die außerordentliche Regenerationsfähigkeit einzelner losgetrennter Stücke war die Veranlassung für vielfache Untersuchungen, die gezeigt haben, daß jedes einzelne Stück eine Polarität besitzt, die nur sehr schwer umkehrbar erscheint.

Die Caulerpen mögen in Ermangelung einer sicheren Ableitung als ein Seitenstück zu den Valoniaceen betrachtet werden.

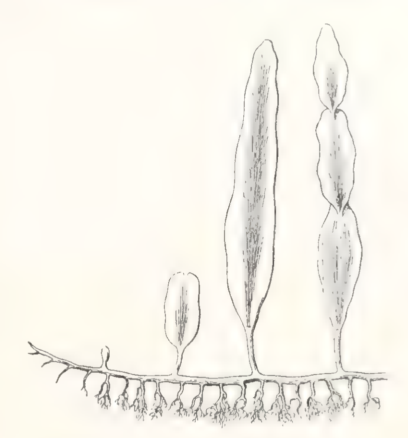


Fig. 38. Caulerpa prolifera.

4. **Vaucheriaceae.** Die Hauptgattung der Familie ist Vaucheria. Sie ist wohl über die ganze Welt verbreitet und zwar kommt sie meistens in Süßwassern vor. Nur einige wenige Arten finden sich im Meere. Einige von den ersteren können als Landformen wachsen.

Die Pflanzen bestehen aus borstenartigen, zylindrischen Schläuchen, welche vielfach seitlich verzweigt sind und bald lockere, bald auch etwas dichtere Massen bilden. Die Befestigung am Substrat erfolgt durch farblose, krallenähnliche Rhizoiden, welche aber nicht von den übrigen Fäden durch eine Wand abgegliedert werden. Auch sonst bildet ja Vaucheria niemals Querwände, es sei denn bei der Fortpflanzung.

Ziemlich viele Vaucheriaarten bilden Zoosporen, die freilich wesentlich anders ausschauen, als die sonst bei grünen Algen üblichen. Soll ein Schwärmer gebildet werden, so sammelt sich dichtes Protoplasma an den keulenförmigen Enden der Fäden an. Dieses wird dann durch eine Querwand abgegliedert und nach kurzer Zeit schlüpft (Fig. 39) die ganze Masse durch einen Riß am Scheitel des Fadens heraus. Das ist die Zoospore, welche mit einem dichten Wimperpelz bekleidet ist und sich mit dessen Hilfe bewegt. Genaueres Studium ergibt, daß inmitten des fraglichen Körpers sich eine Vacuole befindet; in dem Plasma, welches diese umgibt, lagern die Chromatophoren (Fig. 39) und außerhalb derselben befindet sich eine breite helle Plasmaschicht. In diese sind Kerne (k. Fig. 39) eingelagert und vor jedem Kern findet sich ein Geißelpaar. Nach kurzer Bewegung umgeben sich

die Schwärmer mit einer Haut. die Kerne treten nach innen, die Chromatophoren nach außen, und wenn so die übliche Lagerung der beiden Elemente hergestellt ist, wird ein Schlauch getrieben, der wiederum zur Bildung einer normalen Pflanze führt.

Bei einigen Arten unserer Gattung haben die Zoosporen ihre Geißeln eingebüßt und werden als unbewegliche Körper (Aplanosporen) aus ihren Behältern entleert.

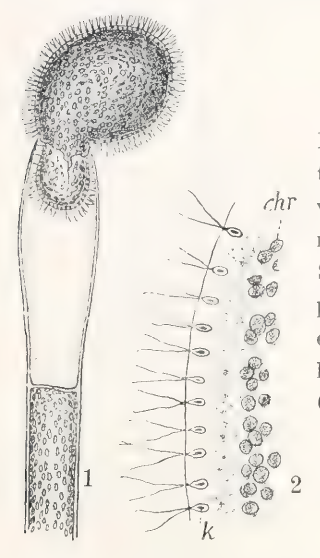


Fig. 39. 1 Austritt der Zoospore von Vaucheria repens. 2 Stück aus dem peripheren Teil einer Zoospore. k Kern. chr Chromatophoren.

Gelegentlich findet auch Abkapselung des Protoplasmas in Cysten usw. statt.

Die geschlechtliche Fortpflanzung erfolgt oogam. In einem der einfachsten Fälle (Vaucheria sessilis) entstehen die Sexualorgane als seitliche Ausstülpungen der vegetativen Fäden. Die Antheridien stellen (Fig. 40) hornartig gekrümmte Körper dar, welche einem ebenfalls gekrümmten Stiele aufsitzen. Ihre Bildung beginnt mit der Einwanderung dichter Plasmamassen und zahlreicher Kerne in das Horn. Chromatophoren dringen wenig ein. Durch eine Querwand wird das Hörnchen dann abgegliedert. In dem so gebildeten Raum entstehen die Spermatozoiden, welche einen großen Kern, wenig Protoplasma und keine Chromatophoren enthalten; diese bleiben im Antheridium zurück. Die Spermatozoiden treten aus der Spitze des Antheridiums (Fig. 40, 2) und bewegen sich mit zwei seitlichen Geißeln.

Die Oogonien (Fig. 40) entstehen ebenfalls durch Einwandern von Protoplasma, von Kernen und zahlreichen Oeltropfen in eine seitliche kugelförmige Anschwellung des Fadens. Mit diesem besteht noch lange offene Verbindung, und merkwürdig ist es nun, daß von den zahlreichen Kernen, welche in das junge Oogon eingewandert sind, alle zurückwandern, bis auf einen einzigen. Erst wenn dies geschehen, wird die weibliche Zelle vom Tragfaden durch eine Wand abgegliedert. Das Oogon besitzt schon ziemlich

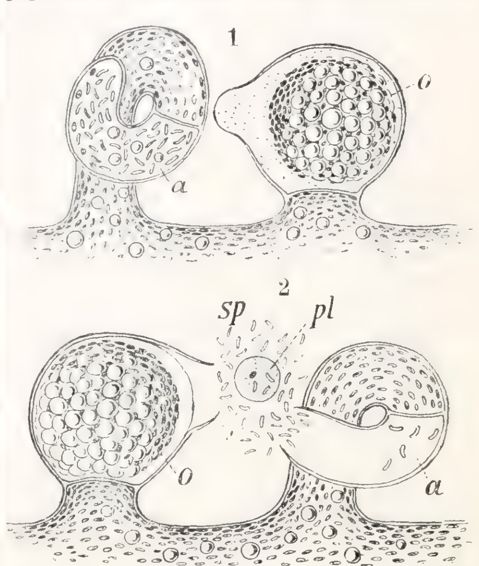


Fig. 40. Vaucheria sessilis. Sexualorgane in 2 geöffnet, in 1 geschlossen. a Antheridien, o Oogonien, sp Spermatozoiden, pl ausgestoßenes Plasma.

früh einen schnabelartigen Fortsatz, in diesem sammelt sich nach Bildung der Querwand farbloses Plasma, während sich die Chromatophoren und das Oel nach rückwärts zurückziehen (Fig. 40, 1).

Plötzlich öffnet sich etwa um 3 Uhr nachts der Schnabel des Oogons und läßt einen Ballen Protoplasma heraustreten (Fig. 40), während der übrige Inhalt sich unter Abrundung ein wenig zurückzieht. Gleichzeitig platzt das Antheridium und die Spermatozoiden schießen durch die Oeffnung des Oogoniums gegen das Ei. Ein Spermatozoid dringt ein und die Kernverschmelzung erfolgt normal. Eine dicke Haut hüllt nachher die entstandene Oospore ein; diese keimt unter Bildung eines grünen Schlauches, nachdem die Haut gesprengt ist. Die Sexualorgane anderer Vaucheriaarten sind in ihrer Stellung wie auch in ihrer Form vielfach von dem abweichend, was wir eben beschrieben haben, prinzipielle Unterschiede in den Befruchtungsvorgängen sind aber nicht vorhanden.

f) Charales. Die Hauptvertreter dieser Gruppe sind die Gattungen Nitella und Chara. Dieselben sind am Boden der Gewässer, in Sand und Schlamm, festgewurzelt, und immer auf das Süßwasser beschränkt. In diesem bilden sie gelegentlich, besonders

in größeren Seen ausgedehnte Bestände, können aber auch in jedem kleinen Tümpel sich zeigen. Da sie wenig sauerstoffbedürftig sind, begnügen sie sich auch mit unsauberem Wasser.

Alle Characeen fallen sofort auf durch die aufrechten mehrfach verzweigten Sprosse, (Fig. 41, 1), welche in erheblichen Abständen wirtelig gestellte Organe tragen, die man gemeinhin als Blätter bezeichnet. Ein Wirtel enthält 6 bis 8 Blätter. Internodien und Knoten sind sonach leicht zu unterscheiden.

Bei der am einfachsten gebauten Nitella stellen die Internodien eine einzige schlauchartige Zelle dar, welche ½ bis 1 mm im Durchmesser und 2 bis 15 cm in der Länge mißt. Die Knoten sind scheibenförmig (Fig. 41), und bestehen aus wenigen zentralen und 6 bis 8 peripheren Zellen. Jede der letzteren gibt einem Blatt den Ursprung. Die Blätter haben im wesentlichen den Bau der Hauptachse, jedoch erscheint das Ganze vereinfacht. Am leichtesten verstanden wird der Aufbau, wenn wir uns einen Vegetationspunkt ansehen (Fig. 41, 2). Wir erkennen leicht eine Scheitelzelle (sz), von welcher durch Querwände Segmente abgegliedert werden. Jedes Segment zerfällt durch eine weitere Querwand in je eine Knoten- und eine Internodialzelle (kn, i). Die Internodialzelle streckt sich einfach in die Länge, die Knotenzelle erfährt Längsteilungen in die zentralen Zellen (ck) und die peripheren (b). Letztere wölben sich vor, bilden einen neuen Vegetationspunkt (vb) und liefern damit den Anfang zu den Blättern (b bl Fig. 41).

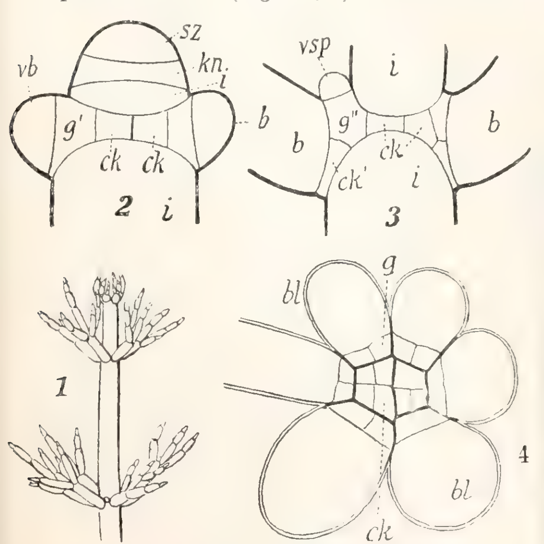


Fig. 41. Nitella. 1 kleiner Sproß, 2 Längsschnitt der Sproßspitze, 3 Längsschnitt eines Knotens, 4 älterer Knoten quer. Erklärung der Buchstaben im Text.

Seitensprosse entstehen an der Blattbasis durch Teilung der mit g'' bezeichneten Knotenzellen, welche die Verbindung zwischen Blatt und Knoten herstellen. Die von g'' nach oben abgegliederte Zelle (vsp) stellt die Scheitelzelle des Seitensprosses dar.

Chara unterscheidet sich von Nitella dadurch, daß die Internodien von einer Hülle umrindet sind. Die Rinde entsteht dadurch, daß die untersten Knoten der Blätter sowohl nach oben als nach unten Lappen entsenden, welche sich den Internodien anschmiegen und in dem Maße wachsen, als die Internodien sich strecken. Sonach müssen sich in der Mitte eines jeden Internodiums der Chara Rindenlappen begegnen, welche teils von den oberen Knoten herab- teils von den

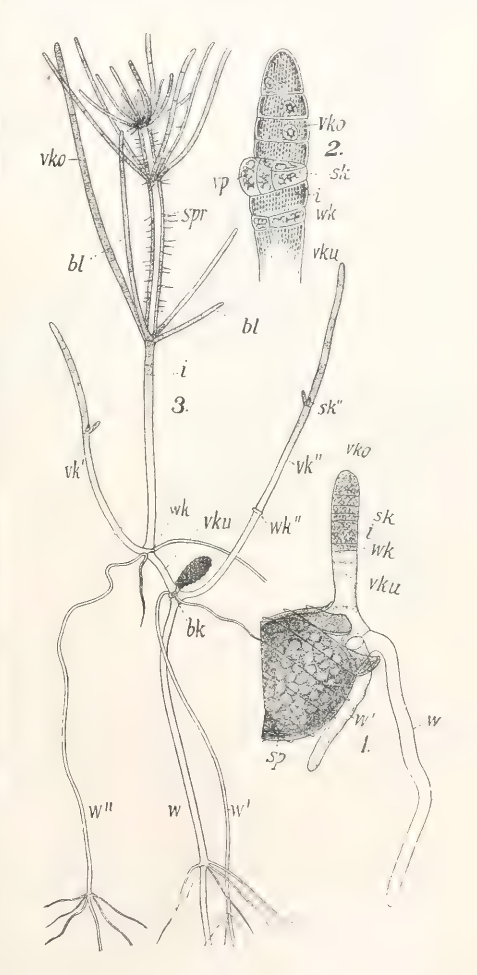


Fig. 42. Chara-Keimlinge. 1 junges Stadium. 2 oberes Ende eines Vorkeimes. 3 junges Pflänzchen. sp Oosporenfrucht. w Wurzel. vk Vorkeim. vku unterer, vko oberer Teil desselben. i Internodium. sk Sproßknoten. wk Wurzelknoten. bk Basalknoten der Wurzel. bl Blätter. vp Vegetationspunkt des Sprosses.

unteren heraufwachsen. Auch in diesen Rindenlappen sind noch Knoten und Internodien zu erkennen. Der Bau einer Chara ist also recht kompliziert. Wir gehen aber auf diese Dinge nicht ein; es gibt Algologen, welche sämtliche Zellen der Charen numeriert haben, und auf diese will ich verweisen. Aus den untersten Internodien der Pflanzen werden noch Rhizoiden in den Boden hinabgesandt.

Der Aufbau einer Chara oder Nitella wird noch durch die Keimlinge illustriert (Fig. 42). Aus dem Scheitel der Oospore brechen bei der Keimung mindestens 2 Fäden hervor (Fig. 42, 1), von denen der eine, nach abwärts wachsend, die junge Wurzel, der andere, nach aufwärts wachsend, den jungen Sproß darstellt. Letzterer ist grün gefärbt und stellt den Vorkeim dar. An diesem sind schon Querwände zu erkennen, welche Internodien und Knoten abgliedern. Erstere strecken sich sehr bald, letztere bilden Seitenorgane. Aber es gehen nicht aus allen Knoten des Vorkeims Blätter hervor, sondern die untern führen die Bezeichnung Wurzelknoten, weil sie (Fig. 42, 3) aus ihren peripheren Zellen Wurzeln bilden, welche nach abwärts in den Boden wachsend, wiederum Internodien und Knoten bilden, von denen letztere dann nochmals Seitenwurzeln liefern (Fig. 42, 3). Die oberen Knoten und Internodien des Vorkeims entwickeln sich normal zu Sprossen. Doch sind bei ihnen alle Verhältnisse noch relativ einfach; z. B. unterbleibt auch bei den Charen an den unteren Internodien des Vorkeims die Berindung.

Fig. 43. Chara fragilis. A Blattstück mit Antheridium (a) und Oogonium (S) im erwachsenen Zustande; B dasselbe im Jugendstadium. SK Oogon. c Blatt. β, β' Blättchen, β'' Brakteolen. c Krönchen. l w Internodium. u Blattknotenzelle. br Berindungslappen. C Manubrium mit spermatogenen Fäden. D dieselben stärker vergrößert und reife Spermatozoiden.

Solange die Zellen der Characeen klein sind, bieten sie nichts besonderes. Sie enthalten dann auch nur einen Kern. In den langgestreckten Internodien und in den Berindungsfäden der Charen sind später mehrere Kerne vorhanden. Diese entstehen aus dem ursprünglichen Kern durch Fragmentation, nicht durch Mitose. Die linsenförmigen Chromatophoren liegen der Zellwand in einer dünnen Plasmaschicht sehr fest an. Sie werden auch nicht in die Protoplasmaströmungen hineingezogen, die seit Corti für die Characeen bekannt sind.

Mancherlei Knöllchenbildungen u. ä. besorgen bei gewissen Formen die ungeschlechtliche Fortpflanzung der Characeen. Zoosporen oder irgend etwas ähnliches ist nicht bekannt.

Die Geschlechtsorgane sind sehr komplizierte Gebilde. Sie entstehen an Stelle von Blättern aus einem Knoten, ungefähr wie das Figur 43 A zeigt. In vielen Fällen sitzt ein Oogon oben, ein Antheridium unten. Doch ist auch die Verteilung der Geschlechter auf verschiedene Pflanzen nicht selten. Die Antheridien sind leuchtend braunrote, kugelförmige Gebilde, deren Wand aus acht sogenannten Schildchen aufgebaut wird. Jedes Schildchen entspricht einem Oktanten. Von der Mitte eines jeden Schildes ragen Stiele (Manubrien) in den Hohlraum des Antheridiums und produzieren, nicht ohne mancherlei Komplikationen, lange, peitschenförmige Fäden, die als spermatogene bezeichnet werden; denn sie bestehen aus lauter kurzen scheibenförmigen Zellen (Fig. 43, C),

deren jede ein Spermatozoid produziert. Letztere werden frei durch Auseinanderfallen der Schildchen. Sie sind schraubig gewunden und am Vorderende mit zwei Geißeln versehen (Fig. 43, D).

Die Oogonien sind ziemlich große, eiförmige Körper, gefüllt mit großen Mengen von Reservesubstanzen. Sie werden hier als Eiknospen bezeichnet, weil sie umhüllt sind von schraubig gewundenen grünen Schläuchen, welche aus der Tragzelle des Oogons hervorgehen (Fig. 43, B). Die Hüllschläuche enden in einem Krönchen (c). Die Zellen desselben schließen nicht völlig zusammen; zwischen ihnen hindurch schlüpfen die Spermatozoiden zum Ei. Nach der Befruchtung die übliche Hautbildung um das letztere, außerdem aber Verholzung und Bräunung der Hüllschlauchwände. So fällt die Oospore ab und keimt in der geschilderten Weise nach längerer Ruheperiode.

Die Verwandtschaft der Charen ist vielumstritten. Manche bringen sie sogar in die Verwandtschaft der Moose.

IV. Heterocontae.

Zum Kummer mancher Fachgenossen, aber nicht zu dem des Verfassers, haben verschiedene Algologen aus der Gruppe der grünen Algen eine Anzahl von Formen herausgenommen und unter dem obigen Namen vereinigt. Es sind Algen, welche alle durch eine grüngelbe Färbung ihrer Platten- oder Linsen-Chromatophoren ausgezeichnet sind. Diese ist bedingt durch die Anwesenheit eines gelben Farbstoffes, der sich mit Salzsäure blau färbt. Charakteristisch ist bei den Heterocontae auch die Form der beweglichen Zellen, die eine lange, und eine relativ kurze Geißel, ferner mindestens zwei seitlich gestellte Chromatophoren besitzen (Fig. 45, 6). Assimilationsprodukt oder Reservestoff ist fast immer ein fettes Oel.

Die niederste Form dieser Gruppe ist Chloramoeba (Fig. 44), ein Flagellat, dessen Zellen zu amöboider Bewegung be-

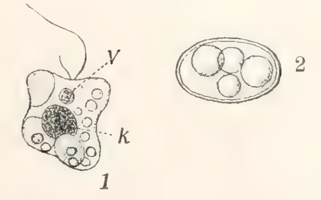


Fig. 44. Chloramoeba heteromorpha Bohl. 1 Flagellat, 2 Eingekapselte Form. v Vakuole, k Kern

fähigt sind Sie tragen die vorgenannten ungleichen Geißeln und enthalten einen Kern und einige Chromatophoren. Chloramoeba soll auch in farblosen Formen auftreten können. Teilung wurde nicht beobachtet, dagegen Einkapselung (Fig. 44, 2).

Chlorosaccus ist eine Chloramoeba, bei welcher die Zellen in eine leicht flüssige Schleimmasse eingebettet sind. In diesem Zustande sind sie unbeweglich, können aber zwei ungleiche Geißeln bilden, und dann die Schleimmassen verlassen.

Die wichtigste Abteilung in unserer Gruppe ist die der Confervaceae. Conferva hießen in alter Zeit fast alle Fadenalgen, die man ungenügend untersucht hatte. Jetzt bezeichnet man als Conferva fadenförmige Gebilde, welche einer Ulothrix ähnlich sehen. Sie unterscheiden sich aber alsbald durch die

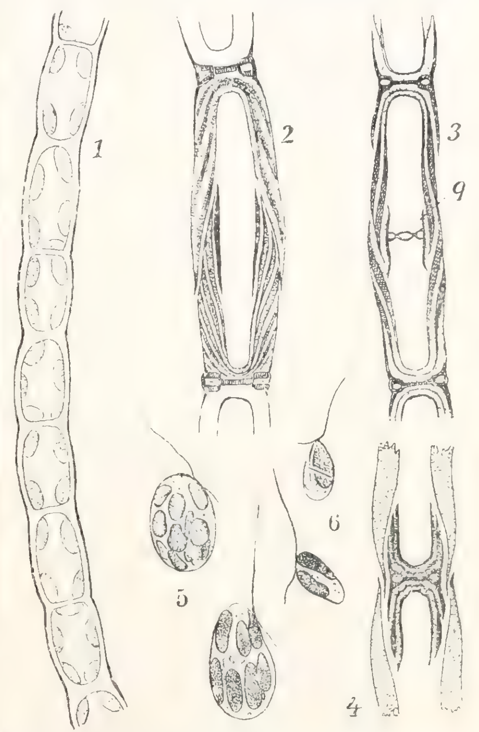


Fig. 45. 1 Vegetativer Faden von Conferva bombycina (Ag.) Lagerh., 2—4 Zellwandbildung von derselben (q Querwand), 5 Schwärmer von Conferva bombycina, 6 desgleichen von Botrydiopsis.

linsenförmigen Chromatophoren, welche in Mehrzal gegeben sind und die vorerwähnte Färbung haben. Außerdem ist die Wand sehr eigenartig gebaut (Fig. 45). Sie besteht fast wie bei den Desmidiaceen aus zwei mit ihren Rändern ineinandergeschobenen Hälften. Bei der Teilung rücken diese auseinander, nachdem ein neues im Längsschnitt ungefähr H-förmiges Stück zwischengeschaltet wurde, wie das Figur 45, 2 bis 4 angibt. Die Vermehrung erfolgt durch Zoosporen, welche (Fig. 45) mehrere Chromatophoren

und etwas seitlich inserierte, ungleiche Geißeln haben. Aplanosporen, Akineten usw. werden ebenfalls angegeben. Geschlechtliche Fortpflanzung zum mindesten unsicher.

In unsere Gruppe rechnen wir auch die Botrydiaceae mit der Gattung Botrydium (Fig. 46). Sie ist früher mit Protosiphon (vgl. Seite 128) verwechselt worden. Die manchmal sogar zu den Siphoneen gerechnete Alge besitzt 2 mm große, grüne, birnförmige Blasen, welche zahlreiche farblose Fortsätze in den Boden hinabsenden (Fig. 46). Die Alge bewohnt nämlich im allgemeinen nicht das Wasser, sondern feuchten Boden, die Ränder von Gewässern usw. Die oberirdische grüne Blase enthält eine riesige Vakuole, einen ziemlich derben Plasmawandbelag, in diesem zahlreiche Linsen-Chromatophoren und noch zahlreichere Kerne. Bei Benetzung mit Wasser bildet die Alge zahlreiche Zoosporen, welche in großen Mengen aus einer Oeffnung am Scheitel ausschlüpfen (Fig. 46, 2). Bislang wurde an ihnen nur eine Geißel nachgewiesen. Geschlechtliche Fortpflanzung unbekannt.

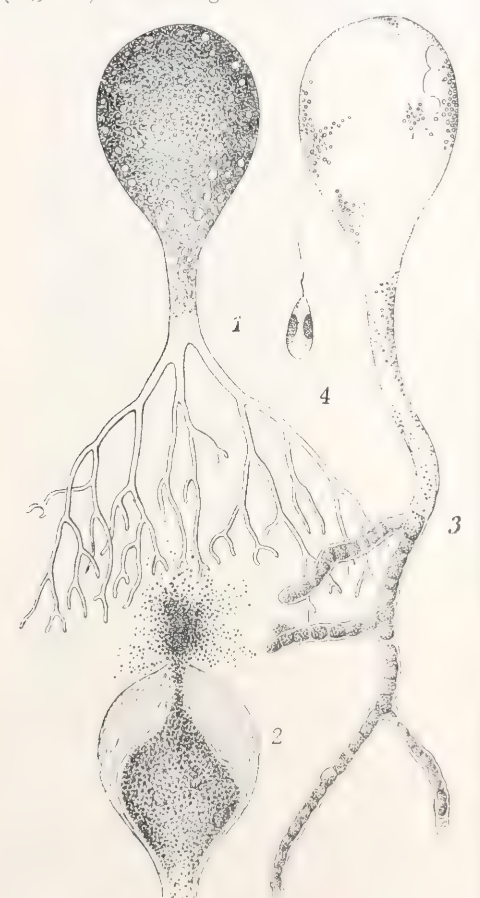


Fig. 46. 1—3 Botrydium granulatum Rost. et Wor., 1 Vegetative Pflanze, 2 Zoosporenbildung derselben, 3 Cystenbildung, 4 Einzelne Zoospore.

Bei starker Besonnung und Austrocknung des Bodens wandert das gesamte Protoplasma in die farblosen Wurzelfortsätze, die ja durch keine Querwand abgegliedert sind. Es zerfällt in eine größere Zahl von Plasmaportionen, die sich mit derber Haut umgeben und nun ruhen können. Bei stärkerer Benetzung wachsen diese Cysten entweder direkt zu neuen Pflanzen aus, oder aber sie bilden Schwärmer, je nach der Behandlung, die ihnen zuteil wird.

V. Phaeophyceae.

Die Form der Vegetationsorgane ist in dieser großen Gruppe der Braunalgen ganz außerordentlich verschieden. Von den zierlichsten Fadenformen steigt die Differenzierung an zu großen, 100 m und mehr langen Gebilden. Gemeinsam aber ist allen die Zellform. Wir finden braune bis gelbe Chromatophoren, welche teils linsenförmig, teils plattenartig erscheinen. Die Zellen haben fast immer einen einzigen Kern. Sehr charakteristisch sind die beweglichen Zellen; mögen sie Zoosporen oder Gameten heißen, immer haben sie birn- oder spindelförmige Umrisse und immer tragen sie die Geißeln seitlich inseriert, eine Geißel nach vorn gerichtet (Fig. 47, 7), eine nach rückwärts. Die Geißeln sitzen immer in unmittelbarer Nähe des Augenflecks und dieser ist wieder dem Chromatophor oder, wo mehrere solche vorhanden sind, einem derselben angeheftet.

Die Braunalgen sind mit ganz wenigen Ausnahmen Meeresbewohner. In den wärmeren Meeren nicht übermäßig reich vertreten, entfalten sie große Mannigfaltigkeit in den Meeren der gemäßigten Zonen und in den, den beiden Polen benachbarten.

Die Phaeophyceen wurzeln wohl in braunen Flagellaten. Doch sind die Uebergänge von diesen zu den typischen Phaeosporen nicht so zahlreich und einleuchtend wie bei den grünen Algen.

a) Phaeosporeae. Die Fortpflanzung erfolgt durch Zoosporen und durch Gameten. Auch letztere sind beweglich.

1. Ectocarpaceae. Den Typus dieser äußerst interessanten Familie repräsentiert die Gattung Ectocarpus. Auch diese Algen sitzen mit einer mehr oder minder lockeren Sohle dem Substrat auf. Von dieser erheben sich in den typischen Fällen reich verzweigte Fäden (Fig. 47, 1), welche immer aus einer Zellenreihe bestehen. Die Zweige enden häufig mit farblosen langen Zellen (Haare). Manche Arten wachsen durch Teilung beliebiger Fadenzellen, andere haben

bestimmt umschriebene Teilungszonen und diese liegen meistens dort, wo die schwach gefärbten Haare in die farbigen Zweige übergehen. In unseren Breiten entwickeln sich die Ectocarpen im ersten Frühjahr, gehen über Sommer sehr stark zurück, um im Herbst noch einmal aufzutauchen.

Ungeschlechtliche Fortpflanzung durch Zoosporen. Die Zoosporangien, früher auch unilokuläre Sporangien genannt, sind (Fig. 47, 6) keulige oder eiförmige Gebilde, welche

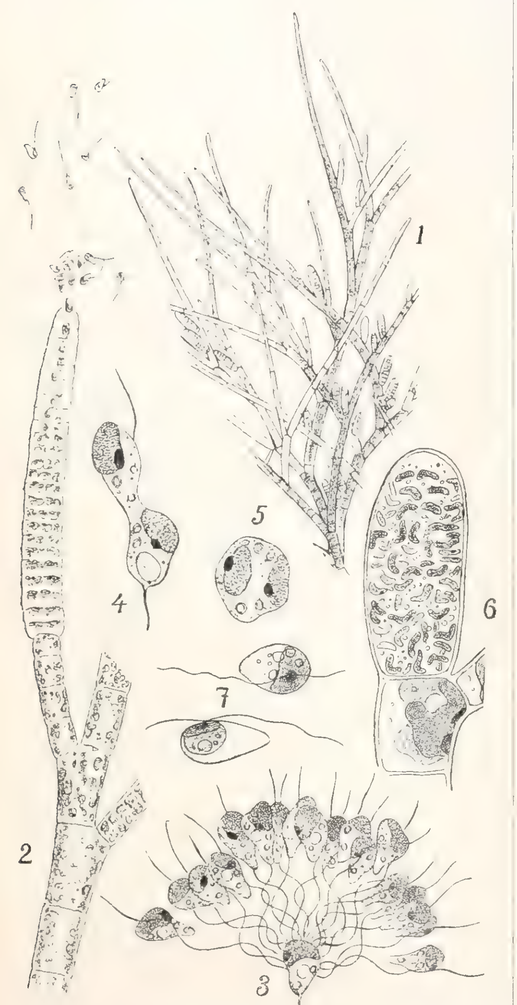


Fig. 47. Ectocarpus. 1 Zweigsystem schwach vergrößert. 2 Gametangium die Gameten entleerend. 3, 4 Sexualakt. 5 Zygote. 6 Zoosporangium. 7 Zoosporen.

meistens auf kurzen Seitenzweiglein stehen. In ihnen werden unter mannigfaltigen Teilungen der Kerne wie auch der Chromatophoren zahlreiche Zoosporen gebildet, ohne daß Zellulosewände zwischen ihnen beständen. Die Zoosporen treten aus, sie haben ganz die typische Form, und keimen, indem sie sich mit der vorderen Geißel festsetzen.

Die geschlechtliche Fortpflanzung erfolgt durch Isogameten. Diese werden in den sogenannten plurilokulären Sporangien (Fig. 47, 2) gebildet; das ist eine Gametangienform, welche in der Regel auch auf kurzen Aesten entsteht und sich häufig durch ihre schlanken Umrisse auszeichnet. Von den Zoosporangien unterscheiden sie sich sofort dadurch, daß sie durch zahlreiche Quer- und Längswände in eine große Zahl von kleinen Zellen zerlegt werden. Jede dieser Zellen wandelt sich zu einem Gameten um, und diese schlüpfen entweder vereinzelt aus besonderen Oeffnungen aus, oder es verquellen die inneren Wände der Mutterzellen, und die Schwärmer treten dann durch eine einzige Oeffnung aus den Gametangien hervor. Die Gameten sind äußerlich gleich gestaltet,

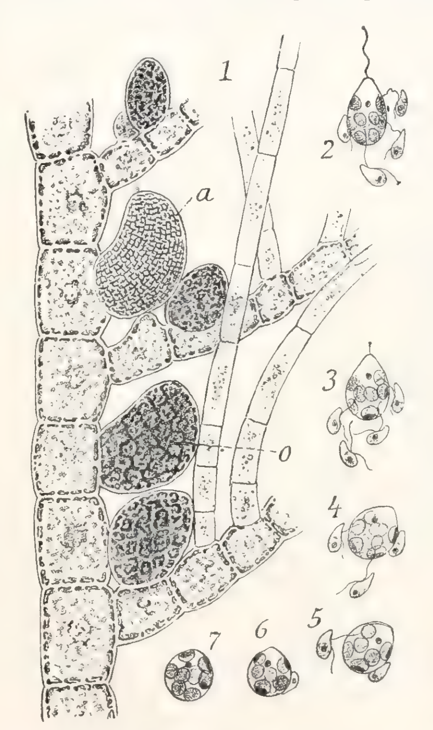


Fig. 48. Giffordia secunda (Ectocarpus s.) Batters. 1 Zweig mit Antheridien (a) und Oogonien (o). 2—7 Befruchtung.

physiologisch aber verschieden, denn es setzen sich nun einige von ihnen (Fig. 47, 3) mit der vorderen Geißel fest, das sind die Weibchen, andere wieder heften sich zu mehreren mit ihrer Vordergeißel dem Weibchen an, das sind die Männchen. Nun verschmilzt sehr bald ein männlicher Schwär-

mer mit einem weiblichen (Fig. 47, 4, 5), während die übrigen verschwinden. Die Zygote keimt sofort.

Dieser höchst interessante Geschlechtsakt ist nur von wenigen Beobachtern gesehen worden, weil die Gameten unserer Pflanzen weit häufiger parthenogenetisch keimen. Und zwar können sich sowohl die männlichen als auch die weiblichen Schwärmer zu normalen Pflanzen entwickeln.

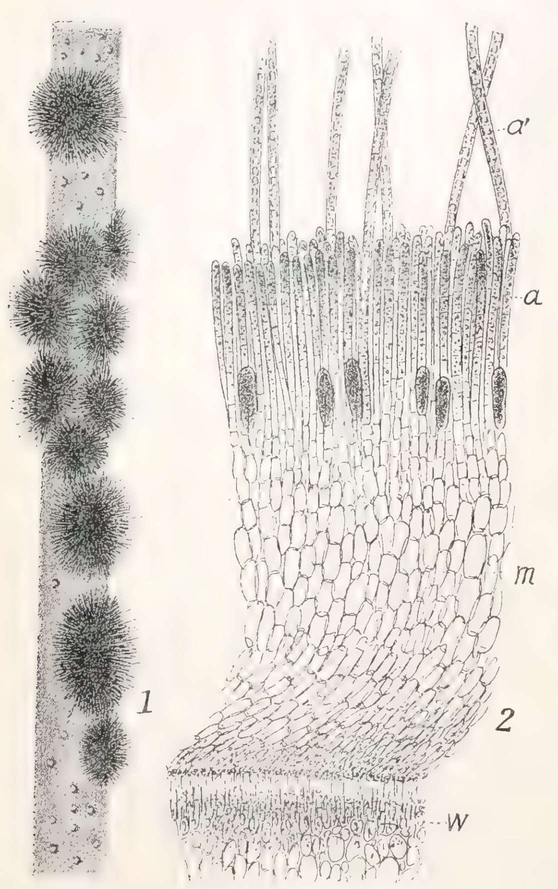


Fig. 49. Elachistea. 1 Polster auf den Riemen von Himanthalia, 2 Längsschnitt durch ein Polster, w Gewebe der Wirtspflanze, m Mark, a a' Assimilatoren.

Die bei Ectocarpus nur angedeuteten Unterschiede zwischen den Gameten treten bei **Giffordia** mit absoluter Schärfe hervor. Die Pflanze an sich wächst (Fig. 48) wie ein Ectocarpus, aber wir unterscheiden männliche und weibliche Gametangien. In den weiblichen (Fig. 48, 1 o) finden relativ wenige Teilungen statt, daher sind die entstehenden Schwärmer groß und mit mehreren Chromatophoren versehen. Die männlichen Gametangien (a) dagegen werden in zahlreiche kleine Zellen zerlegt; die aus ihnen hervortretenden männlichen Gameten sind schwach gefärbt. Sie sammeln sich (Fig. 48, 2) in größeren Mengen um die weibliche Zelle, mit welcher dann einer die Zygote bildet. Diese keimt sofort.

Von den oben erwähnten einfachen Ectocarpeen leitet sich nun eine große Schar von Gattungen her, die in ihren Fortpflanzungsorganen alle mit Ectocarpus selber übereinstimmen, in ihrem vegetativen Aufbau aber eine vielfach höhere Differenzierung erfahren.

Da sind nun zunächst zwei Reihen unterscheidbar und zwar:

a) Die Mesogloeo-Chordarienreihe.

Durch Aneinanderlegen oder komplizierte Verflechtung verzweigter Fäden entstehen Vegetationskörper, die an Chaetophoreen und Coleochaeten einer-, an Siphoneen andererseits anklingen. Die in der Mitte der Sprosse liegenden Fäden pflegen wenig gefärbt zu sein, die gegen die Peripherie ausstrahlenden aber beherbergen eine reiche Fülle von Chromatophoren und werden deshalb auch als Assimilatoren bezeichnet. Die Sporangien und auch die Gametangien sitzen dann mit Vorliebe an der Basis der Assimilatoren (Fig. 50).



Fig. 50. Castagnea (Eudesme). A Habitusbild. B Spitze einer jungen Pflanze. C Büschel von Assimilatoren mit Sporangien. k Zentralfaden, h dessen Seitenäste (Längsfäden), a auswärts gerichtete Seitenäste, v Wachstumszonen.

Einige Beispiele mögen das erläutern.

Elachistea bildet auf größeren Tangen Polster von 5 bis 10 mm Durchmesser (Fig. 49). Diese bestehen aus dichtgedrängten Fäden, die eine Art Mark (m) und eine aus Assimilatoren (a) gebildete Rinde unterscheiden lassen. Ein Teil der Assimilatoren ragt in Form langer flutender Fäden (a′) über das Polster hervor. Die Fortpflanzungsorgane liegen an der Grenze der farbigen und der farblosen Schicht.

Die Arten der Gattung Leathesia sind ähnlich gebaut wie die vorerwähnten Formen, nur sind die die Polster überragenden Fäden farblos. Die Leathesien werden oft zu unregelmäßigen Blasen von erheblicher Größe. Die Myrionemen sind dann wieder flache Scheiben, welche dem Substrat angepreßt, aus parallel gerichteten Assimilatoren gebildet werden.

Wieder im scharfen Gegensatz dazu steht Castagnea (Eudesme). Die Alge bildet (Fig. 50) reich verzweigte Sproßsysteme von 10 bis 20 cm Länge und wenigen Millimetern Dicke, das Ganze ist aber weich und gallertreich. Der Körper besteht (vergleiche auch Codium) aus locker miteinander verschlungenen Fäden. Es ist ein Hauptfaden vorhanden (k) mit zahlreichen Seitenästen (h). Sie alle legen sich der Länge nach aneinander, werden auch tauartig gewunden und entsenden dann in radialer Richtung Seitenzweiglein, die zu Assimilatoren werden und mehr oder weniger palissadenartig aneinander schließen. Letztere tragen auch (Fig. 50, 2) die Sporangien. An ganz jungen Pflanzen kann man (Fig. 50, 3) die übliche Ectocarpeen-Verzweigung erkennen. Die einzelnen Fäden haben intercalare Wachstumszonen (v). Von diesen geht die Bildung der Seitenzweige aus und letztere legen sich bald dem primären sogenannten Zentralfaden parallel. Später erst zeigen sich dann die auswärts gekehrten Zweige.

Recht kompliziert gebaut sind endlich die Chordarien. Hier haben wir nur einen oder einige wenige aber recht kräftige Zentralfäden. Diese bilden ausgiebige (oft wirtelige) Verzweigungen und von ihnen geht die Bildung einer mehr oder weniger dichten und komplizierten Rinde aus. Noch bunter sind die Sporochnideae (Nereia, Sporochnus u. a.), über diese muß die Spezialliteratur nachgesehen werden.

b) Punctario-Scytosiphoneenreihe.

Diese Gruppe bildet kompakte Gewebe, welche durch Teilung aus relativ einfachen Fäden hervorgehen. Beispiele: Desmotrichum stellt ziemlich schmale Bänder dar, die durch Längs- und Querteilungen von kaum verzweigten Fäden entstehen. Punctaria ist auf dem gleichen Wege zu einer breiten Thallusfläche (einer braunen Ulva) geworden, die aus wenigen nicht

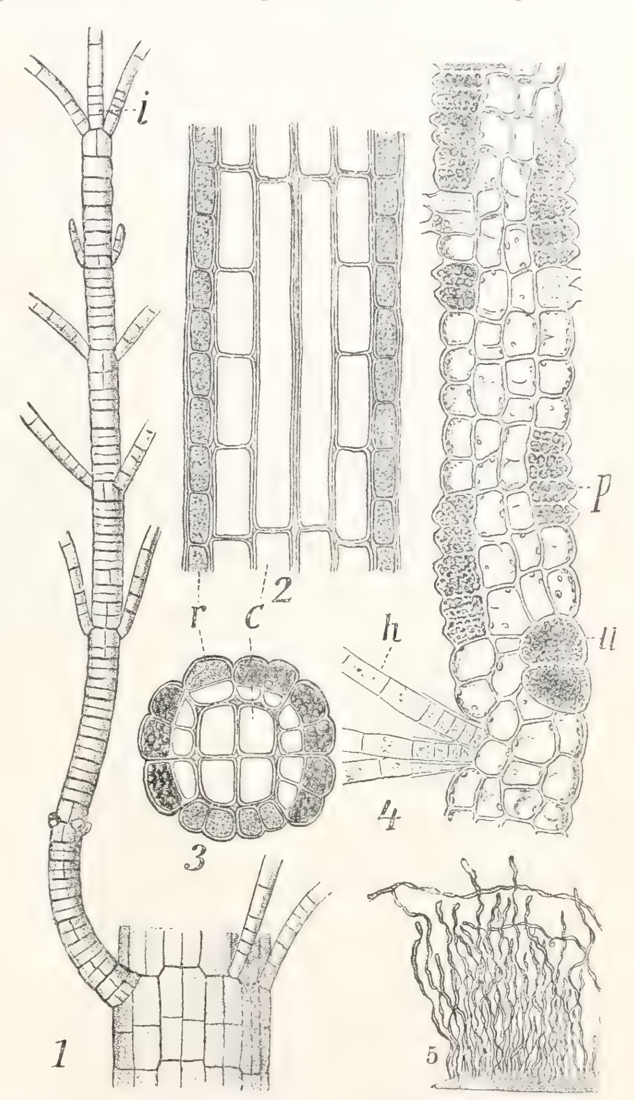


Fig. 51. 1—3 Stichyosiphon. 1 Junger Zweig, 2 Längs-, 3 Querschnitt. c Zentralkörper; r Rinde; i Wachstumszone. 4 Desmotrichum. Habitus. 5 Punctaria. Thallusfläche, quer. h Haare; u Sporangien; p Gametangien.

differenzierten Zellagen (Fig. 51, 4) besteht. Die Gametangien (g) und Sporangien (u) sind in die Fläche eingesenkt.

Auf reich verzweigte Fäden geht Stichyosiphon zurück. Fig. 51, 1 zeigt zur Genüge, daß in den Hauptästen reichlichere, in den Nebenästen spärlichere Teilungen einsetzen. Diese führen in den größeren Sprossen zur Bildung längerer,

schwach gefärbter Zellen in der Mitte und zur Entstehung dunkelfarbiger Assimilationszellen an der Peripherie (Fig. 51, 2). Fast jede Zelle der Oberfläche kann zu einem Sporangium (pp) werden (Fig. 51, 3). In anderen Gattungen oder Arten stehen dieselben etwas regelmäßiger und gruppenweise zusammen.

Mancherlei Verbindungsglieder führen hinüber zur Chorda, der Meersaite. Das sind bis zu 3 oder gar 4 m Länge und 2 bis 4 mm Durchmesser erreichende seltsame braune unverzweigte Gebilde, die tatsächlich am ersten mit einer Saite verglichen werden können.

Mit Krallen am Boden festgeheftet, erheben sich die federkieldicken Schnüre fast vertikal im Wasser und lassen ihre obere Hälfte auf der Oberfläche fluten. Das geht, weil die Saiten hohl werden und dann Luft führen. Die Keimlinge haben nur eine Reihe von Zellen, später entsteht ein ziemlich kompliziertes Gewebe (Fig. 52). An

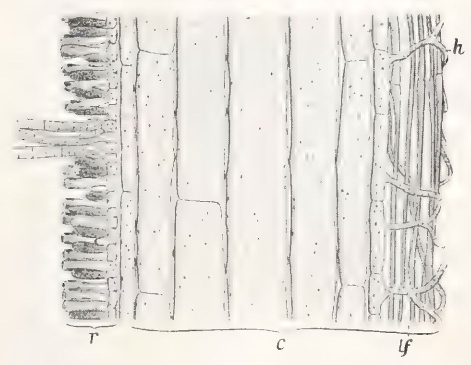


Fig. 52. Chorda Filum. Längsschnitt des Sprosses. r Rinde, c Zentralkörper, lf Längsfasern, h Hyphen.

den mittleren Hohlraum angrenzend finden sich stark gestreckte, straff gespannte, ziemlich dünne Längsfäden (lf), wohl mechanische Elemente. Dann folgen lange aber auch weite Zellen mit einer geringen Zahl von Chromatophoren. Die innerste Schicht dieser Langzellen sendet nach innen hin annähernd horizontale, verzweigte Zellfäden, sogenannte Hyphen (h) aus, welche die Längsfäden durchwuchern und mit ihnen ein ziemlich festes Gewebe herstellen. Alle gestreckten Zellen bilden den Zentralkörper. An der Peripherie (Rinde) werden die Zellen wieder kleiner und produzieren keulenförmige assimilierende Elemente (Paraphysen). Dieselbe Rindenzelle, welche eine Paraphyse liefert, produziert daneben auch ein Sporangium und nur solche sind bekannt, nicht aber Gametangien.

2. Cutleriaceae. Der wichtigste Vertreter dieser Familie ist die Gattung Cutleria. Sie ist besonders dadurch ausgezeichnet, daß geschlechtliche und ungeschlechtliche Fortpflanzungsorgane auf ganz verschieden gestalteten Vegetationskörpern gebildet werden, so daß tatsächlich zwei Generationen entstehen.

Die ungeschlechtliche Generation wird gebildet von braunen Scheiben oder Krusten (Fig. 53), welche dem Gestein am Meeresboden fest angepreßt sind. Diese führten früher den Namen Aglaozonia. Sie produzieren auf ihrer Oberseite dicht gedrängt zahlreiche Zoosporangien, welche recht große Zoosporen entlassen. Aus diesen geht bei der Keimung die geschlechtliche Generation die eigentliche Cutleria hervor. Sie

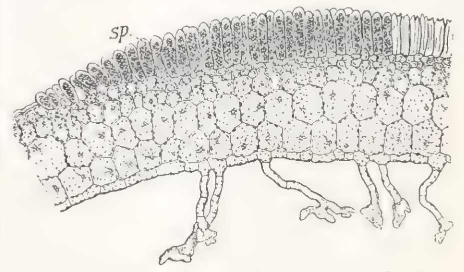


Fig. 53. Aglaozonia-Scheiben der Cutleria im Längsschnitt. sp Sporangien.

stellt entweder einfache flache Scheiben dar, oder aber Vegetationskörper, welche durch vielfache Risse in zahlreiche bandförmige Abschnitte zerlegt sind. Besagte Thallome besitzen ein sogenanntes trichothallisches Wachstum, d. h. ihr Rand ist aufgelöst in zahlreiche Haare und dort wo diese in die festen Gewebemassen übergehen, finden Teilungen statt, welche einerseits die Haare nach außen hinausschieben, andererseits neue Elemente an den festen Thallus anbauen.

Die Cutlerien besitzen im Innern ihrer Sprosse ein großzelliges Gewebe (Fig. 54, 1), dieses wird gedeckt durch eine kleinzellige Epidermis und aus dieser entspringen dann Büschel farbiger Fäden, welche die Gametangien tragen (Fig. 54, 1). Die männlichen Gametangien (Fig. 54, 2) produzieren wieder zahlreiche, fast farblose Spermatozoiden. Die weiblichen werden nur in wenige Zellen aufgeteilt (Fig. 54, 1), und diese entlassen große Gameten, welche sich mit ihren zwei Geißeln nur kurze Zeit bewegen, dann aber rasch unter Abrundung zur Ruhe kommen. Das helle Vorderende der Schwärmer bleibt erhalten und stellt den Empfängnisfleck des Eies dar. In ihn dringt dann ein Spermatozoid ein (Fig. 54,5). Aus der sofort keimenden Zygote entsteht ein wenigzelliges Säulchen, und aus diesem wächst dann an der Basis die Kruste hervor, welche wir oben als Aglaozonia, d. h. als ungeschlechtliche Generation bezeichneten.

Notwendig ist indessen ein solcher Wechsel der Generationen nicht. Die ungeschlechtliche Generation kann wieder eine ungeschlechtliche erzeugen, aus der geschlechtlichen kann wieder eine Geschlechtsgeneration produziert werden, je nach den Bedingungen, unter

welchen die Pflanze lebt. Diese kommt im Mittelmeer und an den Küsten des atlantischen Ozeans bis nach Norwegen hinauf vor.

An den nordischen Standorten ist fast nur die Aglaozonia vertreten, in den südlichen Standorten mögen beide Generationen regelmäßig miteinander abwechseln. Die Komplikation dieser Erscheinung wird noch vermehrt durch den Umstand, daß nur in südlichen Meeren, z. B. im Mittelmeer, Normalbefruchtung einsetzt. An den englischen Küsten keimen die weiblichen Gameten fast alle parthenogenetisch, kommen doch dort im günstigsten Falle auf viele weibliche Exemplare einige wenige männliche.

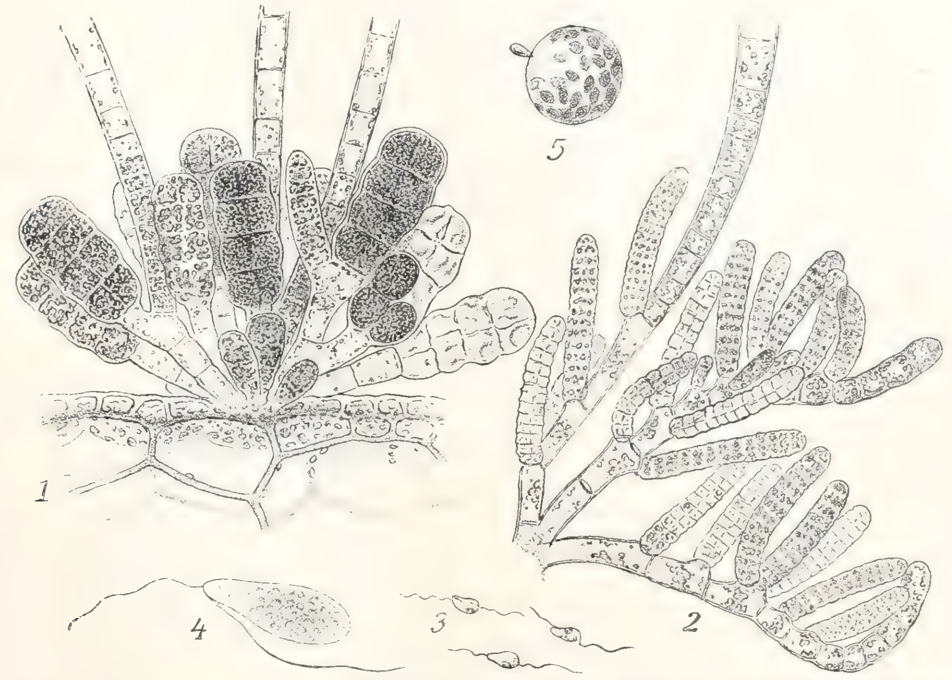


Fig. 54. Cutleria multifida. 1 weibliche Gametangien (Oogonien), 2 männliche Gametangien (Antheridien), 3 Spermatozoiden, 4 bewegliches, 5 abgerundetes Ei, im Moment der Befruchtung.

3. Sphacelariaceae. Ganz auffallend große Scheitelzellen mit dunkel gefärbtem Inhalt gaben den Sphacelariaceen den Namen; sie sind auch tatsächlich das Merkzeichen dieser Gruppe. Greifen wir auch hier ein Beispiel heraus, z. B. Sphacelaria plumigera, so hat diese Alge wieder die unvermeidliche Sohle, von der sich regelmäßig verzweigte, verhältnismäßig derbe Sprosse erheben. Haupt- und Nebenäste tragen zylindrische, oben gerundete Scheitelzellen (Fig. 55, 1). Querwände gliedern von diesen Segmente ab (Fig. 55, 1) und diese werden dann erst durch eine Querwand, später durch Längswände in sehr regelmäßig gestellte Zellen zerlegt, die auch später noch ihre Herkunft aus den Segmenten in der Anordnung verraten. Querschnitte ergeben, daß eine wenigzellige, zentrale Gruppe von mäßig vielen peripheren Zellen umgeben wird.

Bei der Aufteilung der Segmente bleiben einige größere Zellen übrig, sie werden nicht so weitgehend zerlegt wie die üblichen Sproßzellen. Das sind (zwi Fig. 55, 1, 2) die Initialen für die Seitensprosse. Sie wölben sich im gegebenen Moment vor, liefern eine neue Scheitelzelle und damit auch die Anlage zu einem Zweig.

Eine ungeschlechtliche Fortpflanzung kann durch Brutknospen erfolgen. Kurze Seitenzweiglein bilden 2 bis 3 kurze Arme (Fig. 55, 4) und lösen sich alsdann von der Mutterpflanze los, indem der Stiel bricht.

Der geschilderte Aufbau erfährt im einzelnen bei verschiedenen Formen mancherlei Modifikationen. Komplikationen treten ein durch Berindung der Hauptsprosse usw., Vereinfachungen durch Reduktion der aufrechten Triebe und Ausgestaltung der Sohlen usw.

Die Gattungen Stypocaulon und Halopteris sind die Vertreter eines etwas anderen Typus. Die Scheitelzellen sind hier noch auffallender als sonst (Fig. 56).

Die Seitensprosse werden nicht wie oben, aus Derivaten der Segmente gebildet, son-

dern aus der Scheitelzelle selber. In dieser ensteht eine schräge, uhrglasförmige Wand und schneidet eine etwa linsenförmige Zelle (zwi) heraus. Anfangs nahe dem Scheitel gelegen, wird sie durch das weitere Wachstum der Scheitelzelle auf die Seite geschoben und

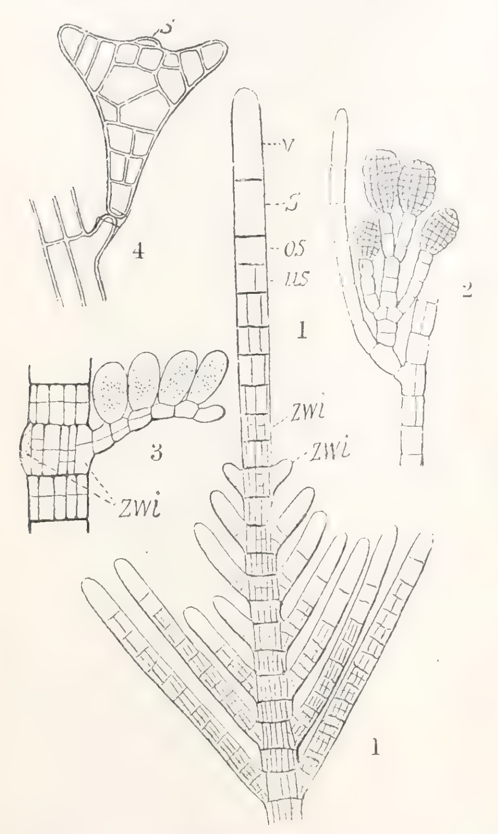


Fig. 55. 1 Sphacelaria plumigera. 1 Sproßspitze, v Scheitelzelle, s Segment, os oberes, us unteres Segment. 2 Sphacelaria bracteata. 3 Sphacelaria Reinkei; Sproß mit Zweiginitialen zwi Zweiginitialen und Fruchtast. 4 Zweig mit Gametangien.

wächst dann zum neuen Sproß aus. Die Zweiginitialen geben schon sehr zeitig durch Uhrglaswand eine Zelle (ax) ab, welche dem Muttersproß zugekehrt ist. Diese rückt bald ganz in die Achsel; sie kann, verschiedenen Gebilden — auch Sporangien und Gametangien — den Ursprung geben. Alle diese Gebilde nennt man dann pseudoaxillär. In unserer Figur 56 entstanden so die Haare (h).

Die auf dem beschriebenen Wege gebildeten Zweiginitialen wandeln sich natürlich zu normalen Scheitelzellen um und können dann unter andauernder Betätigung Langtriebe (ltr) bilden. Vielfach aber stellen sie ihr Wachstum zeitig ein, dann gibt es Kurztriebe (ktr).

An den älteren Sprossen kommen sekundäre Rindenbildungen usw. vor.

Noch komplizierter ist **Cladostephus**. Die Hauptachsen tragen zahlreiche primäre Wirteläste in gleichmäßigen Abständen, zwischen diese werden sekundäre eingeschaltet. Diese sind die fruktifizierenden. Auch sonst noch Komplikationen (vgl. „Literatur").

Fortpflanzung aller Sphacelariaceen wie bei den Ectocarpeen. Sporangien und Gametangien meist etwas kürzer als bei den Ectocarpeen, dafür wenig breiter (Fig. 55).

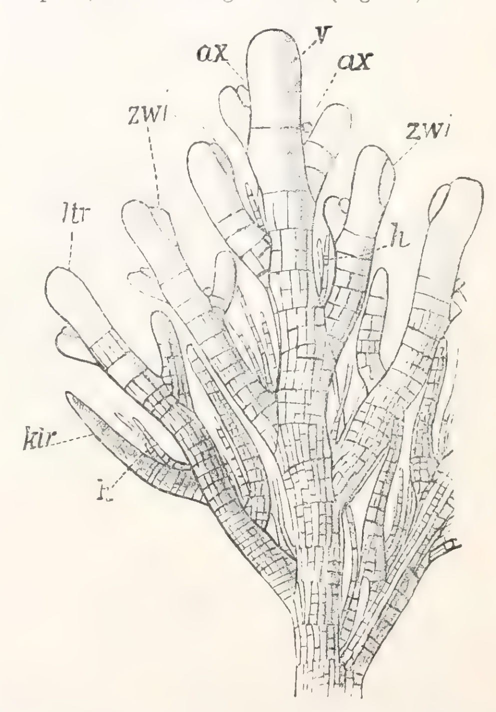


Fig. 56. Stypocaulon. v Scheitelzelle, zwi Zweiginitialen, ax pseudoaxilläre Zellen, h Haare ltr Langtriebe, ktr Kurztriebe.

4. Laminariaceae. Die Laminarien sind die größten unter allen Algen. Formen von ½ m Höhe sind Zwerge unter ihnen. Nereocystis und Macrocystis erreichen eine Länge von 80 bis 100 m. Die Laminarien finden sich in großen Mengen in den Meeren um den Nord- und Südpol, und von dort aus erstreckt sich ihr Verbreitungsgebiet nach Südafrika und Südamerika einerseits, an die Küsten des atlantischen und stillen Ozeans andererseits. So sind an englischen und französischen Küsten Laminarien noch recht häufig. In den wärmeren Meeren aber treten sie stark zurück.

Wir gehen aus von einfachen Formen wie Laminaria saccharina (Fig. 57). Diese gleicht einem gestielten Blatt. Die Pflanze wird mit derben Krallen, welche das

Gestein umklammern, festgehalten; von ihnen erhebt sich ein runder Stiel, und dieser trägt dann eine mehr oder minder breite Spreite. Letztere ist bei der genannten Form zungenförmig. Bei Laminaria digitata und bei nicht wenigen anderen Arten ist das Blatt breiter, wird aber durch zahlreiche Längsrisse zerschlitzt.

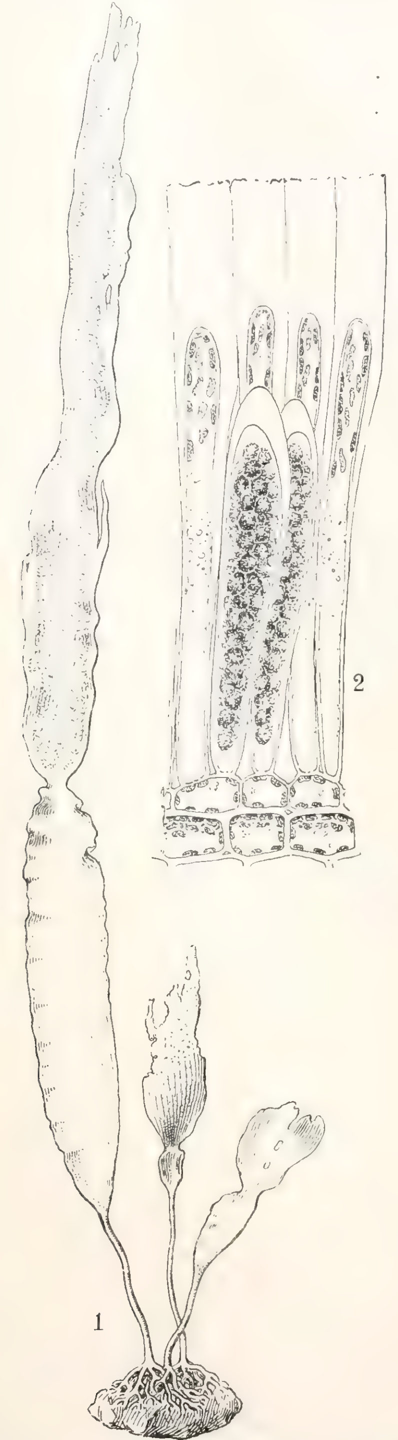


Fig. 57. Laminaria saccharina. 1 Pflanze im Laubwechsel, 2 Sporangien mit Paraphysen.

Eine Eigenart der Laminaria ist es, ihr Laub abzuwerfen. In den nördlichen Meeren beginnt etwa im Februar eine Zone rapide zu wachsen, welche an der Uebergangsstelle des Stiels in die Spreite liegt. Durch das hier gebildete Meristem entsteht zunächst (Fig. 57, 1 rechts) eine kleine scheibenförmige Erweiterung. Diese wächst aber im Laufe weniger Wochen zu einem neuen Laminariablatt heran (Fig. 57, 1 links). Die alte Spreite wird, wie aus der Figur ersichtlich ist, noch lange Zeit auf der Spitze der jungen getragen, schließlich aber fällt sie der Zerstörung durch die Wellen anheim. Das mag im Mai vor sich gehen. Im Laufe des Sommers oder gegen den Herbst hin, an manchen Orten sogar noch im Winter, werden dann auf dem Laub die Sporangien gebildet, von denen wir gleich reden wollen.

An die eigentlichen Laminarien schließen sich die Lessonien an. Das sind Algen des Feuerlandes, welche Baumform annehmen. Bis zu arms-

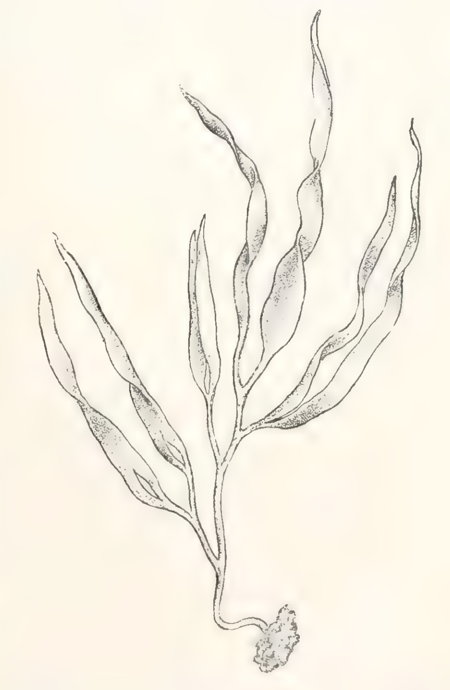


Fig. 58. Lessonia. Kleine, junge Pflanze.

dicke aufrechte Stämme verzweigen sich reichlich, und alle Zweige gehen an ihren Enden in flache Triebe über. Auch hier liegt an der Grenze zwischen Stiel und Spreite eine wachstumsfähige Zone. In dieser vollzieht sich die eigenartige

Verzweigung der Pflanzen. In dem basalen Meristem entstehen nämlich Längsrisse, und diese dehnen sich nach oben hin so lange aus, bis die ursprünglich einheitliche Fläche in annähernd gleiche Hälften zerlegt ist. Der Spaltung des Blattes folgt auch die des Stieles bis zu einem gewissen Grade. Die Abbildung Figur 58 zeigt das ohne weiteres.

Hierher gehört dann auch die seltsame Macrocystis von der Südspitze Südamerikas. Tief unten am Meeresgrunde festgekrallt, entsendet sie aufrechte Sprosse viele Meter weit bis an die Oberfläche des Wassers. Hier biegen dieselben um und schwimmen nun wie lange Peitschenäste auf dem Wasser. Die Sprosse tragen seitwärts eine große Anzahl blattähnlicher Gebilde. Diese hängen im Wasser von den Hauptsprossen herab. Große Blasen, welche die Blätter nahe an ihrem Insertionspunkte führen, sorgen dafür, daß das Ganze an der Oberfläche schwimmend erhalten bleibt (Fig. 59).

Das Spitzenwachstum von Macrocystis ist sehr seltsam. Am Ende der Sprosse sitzt eine große Fahne. An der in Figur 59 mit v bezeichneten Stelle spalten Risse von der Endfahne immer neue Riemen ab und diese formen sich dann zu „Blättern" um.

Eine kleine Gruppe von Laminarien, zu denen Alaria gehört, ist ausgezeichnet durch eine derbe Mittelrippe, welche durch die ganze Spreite verläuft, und dieser die nötige Festigkeit verleiht.

Alle Laminariaceen sind entweder in ihren Stielen oder in ihren Spreiten ganz außerordentlich biegsam und können infolge dessen auch dem Wellengang den nötigen Widerstand entgegensetzen.

Der anatomische Aufbau wird am besten durch die Figur 60 illustriert. In den Stielen findet sich außen ein ziemlich kleinzelliges Rindengewebe (r). Die peripheren Zellen sind in ständiger Teilung begriffen und fügen von außen her immer neue Elemente an die alten an. Die älteren Zellen strecken sich in dem Maße, als sie weiter nach innen zu liegen kommen. Die innersten lösen sich außerdem noch mit ihren Längswänden voneinander los und rücken weit auseinander. Zwischen die entstehenden Lücken wachsen dann vielverschlungene Fäden, sogenannte Hyphen ein, und bilden hier das sogenannte Mark (m). Alle langgestreckten Zellen nennt man Zentralkörper (c).

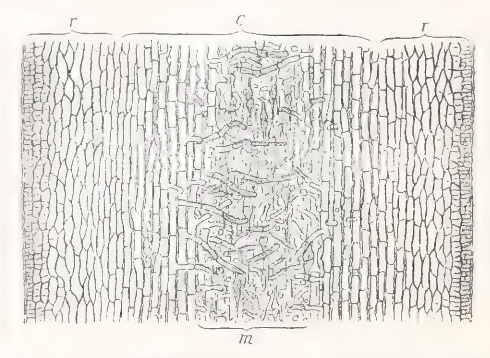


Fig. 60. Längsschnitt durch den Stil eines Laminaria-Keimlings. r Rinde, c Zentralkörper, m Mark.



Fig. 59. Macrocystis pyrifera. 1 Habitusbild ungeheuer verkleinert, 2 Endstück des Sprosses, v Wachstumszone.

Die Spreiten sind ähnlich gebaut. Die Auflockerung der Zellen in der Mitte geht weiter, Hyphen pflegen zu fehlen.

Bei manchen Laminariaceen kommen in den Stielen noch siebröhrenähnliche Gebilde vor; auch werden bei manchen Formen eigenartige Schleimhöhlen gefunden.

Zum Zwecke der Fortpflanzung bildet die

äußerste Zellschicht pallisadenähnliche Zellen aus (Fig. 57, 2), die sogenannten Paraphysen, und zwischen diese schieben sich dann Sporangien ein. Die aus ihnen hervorgehenden Schwärmer liefern wieder neue Laminariapflänzchen. Nach einer Angabe sollen sie vorher paarweise miteinander verschmelzen, jedoch ist das nicht ganz klar.

b) Akinetosporeae. Allen Angehörigen dieser kleinen Gruppe gemeinsam ist der Besitz unbeweglicher Fortpflanzungsorgane neben den üblichen Sporangien und Gametangien.

1. Tilopteridaceae.

Hierher gehören Akinetospora, Haplospora (= Scaphospora), Tilopteris. Kenntnisse noch lückenhaft, weil die Arten nicht häufig sind.

Die genannten Gattungen besitzen den Habitus mittlerer Ectocarpeen. Zumal bei Tilopteris werden die älteren Sprosse durch Längs- und Querteilung der Fadenzellen vielzellig.

Die Zellen haben annähernd den bei Phaeophyceen üblichen Bau.

An Fortpflanzungsorganen sind bekannt:

1. Uniloculäre Sporangien, ähnlich wie bei Ectocarpeen.

2. Pluriloculäre Sporangien, mit großen Fächern, die großen aus ihnen austretenden Schwärmer keimen direkt. Vielleicht sind es parthenogenetisch keimende Eier.

3. Pluriloculäre Sporangien mit zahlreichen kleinen Fächern und kleinen Schwärmern, wohl

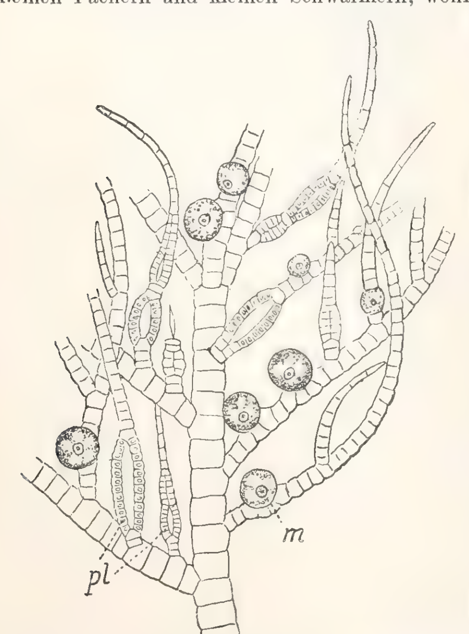


Fig. 61. Haplospora. m Monosporangien, pl plurilokuläre Sporangien.

Antheridien oder Spermatozoiden. Sie liegen in kurzen Seitenzweiglein (Fig. 61, pl). Die kleinen Zellen umschließen mantelartig einen Hohlraum. Diese eben genannten Organe sind bislang nicht alle, bei allen Gattungen und Arten nachgewiesen. Ueberall gefunden sind aber die

4. Monosporangien, sehr große gestielte oder in den Fäden liegende Zellen (m Fig. 61), welche in der Regel einen, bei Haplospora aber unter gewissen Bedingungen, 4 Kerne führen. Bei der Reife tritt aus den in Rede stehenden Gebilden eine große Monospore aus. In einigen Fällen ward die Keimung beobachtet, in anderen rasches Zugrundegehen angegeben.

Die verschiedenen Fortpflanzungsorgane können wohl vielfach nebeneinander vorkommen, doch gibt es auch Fälle, in welchen nur eine Sporangienform allein beobachtet wird.

2. Choristocarpaceae.

Fädige Formen im Wachstum den Sphacelariaceen nahestehend. Sie besitzen Sporangien und wohl auch Gametangien, daneben kommen keulige Brutknospen vor, die nur aus wenigen sehr großen Zellen bestehen.

c) Cyclosporeae. Die geschlechtliche Fortpflanzung geschieht durch große, unbewegliche, nackte Eier und kleine, leicht bewegliche Spermatozoiden. Soweit eine ungeschlechtliche Fortpflanzung vorhanden ist, erfolgt sie durch unbewegliche Sporen.

1. Dictyotaceae. Dictyota dichotoma hat bandförmige Sprosse, welche alle in einer Ebene dichotom verzweigt sind. Dieselben werden aus einer mittleren Schicht großer, schwach gefärbter Zellen aufgebaut, die beiderseits von einer kleinzelligen, stark gefärbten Epidermis überzogen sind (Fig. 62). Die Sprosse wachsen mit einer Scheitelzelle, welche durch gebogene Wände Segmente abgliedert. Die Dichotomierung erfolgt durch Längsteilung einer Scheitelzelle. Von der Epidermis entspringen Gruppen langer, farbiger Haare (Fig. 62).

Die ungeschlechtliche Fortpflanzung erfolgt durch sogenannte Tetrasporen, die ich wohl als Aplanosporen auffassen möchte. Zur Bildung derselben wölbt sich eine Epidermiszelle zu einer großen Kugel vor, und in dieser wird dann der Inhalt in vier Teile zerlegt, von denen jeder eine Tetraspore darstellt (Fig. 62, 1). Diese schlüpfen aus, indem sie die Wand durchbrechen, und erscheinen nunmehr als nackte Kugeln, welche sofort keimen.

Bei Beginn der geschlechtlichen Fortpflanzung wölben sich auf gewissen Individuen Gruppen von Epidermiszellen vor und bilden große, intensiv gefärbte Zellkomplexe, die Oogonien (Fig. 62, 2). Aus jedem Oogon schlüpft ein großes Ei heraus. Auch die Antheridien (Fig. 62, 3) gehen aus Epidermiszellen hervor, welche sich weit vorwölben. Die vorgetriebenen Zellen werden nun aber durch zahlreiche Wände geteilt, und aus jeder der so entstehenden kleinen Zellen schlüpft ein fast farbloses Spermatozoid aus. Die Spermatozoiden verschmelzen mit dem Ei, und die Zygote keimt sofort.

Man kann bei Dictyota dreierlei verschiedene Individuen unterscheiden: solche mit Tetrasporen, mit Oogonien und mit Antheri-

dien, und es wurde der Nachweis erbracht, daß die Tetrasporenpflanzen bei Kernteilungen 32 Chromosomen erkennen lassen, und zwar bis zu dem Zeitpunkt, wo die Tetrasporen gebildet werden. In den Tetrasporangien wird dann die Chromosomenzahl auf 16 reduziert, und diese wird durch alle geschlechtlichen Pflanzen beibehalten. Infolge der Befruchtung bekommt der Zygotenkern dann wieder 32 Chromosomen. Durch die Kultur ist nachgewiesen, daß aus den Tetrasporen immer Geschlechtspflanzen, und aus den Zygoten immer ungeschlechtliche Individuen hervorgehen.

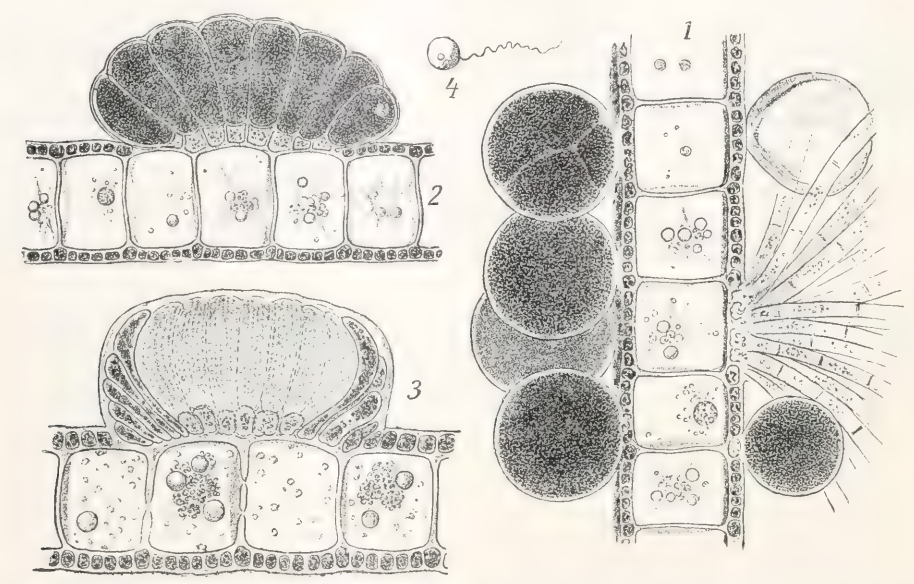


Fig. 62. Dictyota dichotoma. Nach Thuret. Thallusquerschnitte, 1 mit Sporangien, 2 mit weiblichem, 3 mit männlichem Sorus, 4 Spermatoid. Nach Williams.

In die Familie gehört noch Taonia Atomaria, mit ähnlichem aber unregelmäßigerem Wuchs als Dictyota. Ferner Padina Pavonia, die „Orechio di mare" der Italiener, mit blattartigen, fächerförmigen Sprossen, die meist zusammengerollt sind. Endlich Haliseris mit fucusähnlichem Habitus.

2. Fucaceae. Von den Fucaceen leben Fucus und seine nächsten Verwandten vorzugsweise in nordischen Meeren und suchen mit Vorliebe diejenigen Regionen auf, welche zwischen Hoch- und Niedrigwasser liegen. Sargassum, Cystosira und andere bevorzugen die wärmeren Meere und wachsen meistens ein wenig tiefer.

a) Die Fucusreihe beginnt mit der Gattung Fucus. Das sind in einer Ebene gabelförmig verzweigte, breit riemenförmige Gebilde, welche vielfach mit Schwimmblasen versehen sind. Letztere entstehen einfach als Auftreibungen des Thallus. Der Thallus hat eine ziemlich derbe Mittelrippe und ist mit einer sehr starken Haftscheibe am Substrat befestigt.

Wir verstehen den Aufbau der Pflanze am besten, wenn wir vom Keim ausgehen. Die kugelige Zygote wird bei der Keimung birnförmig, durch eine Querwand wird sehr bald die Wurzel vom Sproß geschieden (Fig. 63, 1). Der Sproß liegt auf der Licht-, die Wurzel auf der Schattenseite. Die Wurzeln heften den Keimling unter mehrfacher Verzweigung am Substrat fest. Die Sproßzelle wird durch vielfache Wände zerlegt und geht dann bald in ein keulig abgeflachtes Gebilde über (Fig. 63, 2). Schon früh erscheint auf dem Scheitel ein Spalt mit lippenförmigen Rändern. Aus dem Grunde desselben brechen Haare hervor, und zwischen diesen erkennt man auf Längsschnitten die Scheitelzelle, welche anfangs dreiseitig, später aber vierseitig ist. Ihre sehr eigenartigen Teilungsfolgen mögen in den Handbüchern nachgesehen werden. Figur 63, 3 gibt einige Andeutungen.

Das durch die Aufteilung der Scheitelzellsegmente entwickelte Gewebe ist an der Oberfläche eine fest geschlossene Rinde. Diese gibt, wie bei Laminaria, nach innen Zellen ab, die sich erheblich strecken, und unter Schleimbildung mit ihren Längswänden voneinander lösen (Fig. 63, 3). Querverbindungen bleiben natürlich erhalten. In der Mittelrippe produzieren jene Längswände zahlreiche Auswüchse —

Hyphen. Sie zeichnen sich durch stark verdickte Wände aus, schlängeln sich zwischen den primären Gewebeelementen der Mittelrippe hindurch nach abwärts und bedingen die außerordentliche Zugfestigkeit der Rippe von Fucus. Die untersten Hyphen brechen



Fig. 63. Fucus. 1 junger Keimling, 2 älterer Keimling, 3 Längsschnitt senkrecht zur Fläche einer älteren Keimpflanze, 4 Sproßspitze einer alten Pflanze.

dann an der Basis der Pflanze hervor und bauen die Haftscheibe mit auf, indem sie, dem Substrat angeschmiegt, nach allen Richtungen hin durcheinander wachsen.

Der ganze Thallus ist mit Haargruben bedeckt, d. h. mit flaschenförmigen Vertiefungen, welche nur mit einem engen Porus nach außen münden. Sie entstehen dadurch, daß eine Epidermiszelle durch vielfache Teilungen ihrer Nachbarn in das Gewebe versenkt wird. Die die Gruben innen auskleidenden Zellen wachsen zu Haaren aus und diese ragen aus der Mündung des ganzen Gebildes weit hervor, zumal wenn die Pflanzen längere Zeit intensiv belichtet werden.

An Fucus schließt sich Ascophyllum mit schmalen bandförmigen und schwach dichotom verzweigten Hauptsprossen. Die Pflanze ist vor allem dadurch ausgezeichnet, daß sie aus eigenartigen Gruben am Rande des Thallus Astbüschel entsendet, welche einer seitlichen Verzweigung ihr Dasein verdanken.

Pelvetia ist eine recht kleine Form, sie wächst in und über der Brandung, verträgt auch das Austrocknen auf kurze Zeit.

Himanthalia bildet lange, schmale gabelig verzweigte Riemen, die in der Brandung fluten. Die ganzen Riemen tragen Fortpflanzungsorgane. Die Pflanze ist mit einer starken Haftscheibe am Substrat befestigt, über derselben besitzt sie eine auffallende scheibenförmige Verbreiterung. Diese ernährt die Pflanze, bis sie völlig verankert ist, dann erst werden die Riemen gebildet.

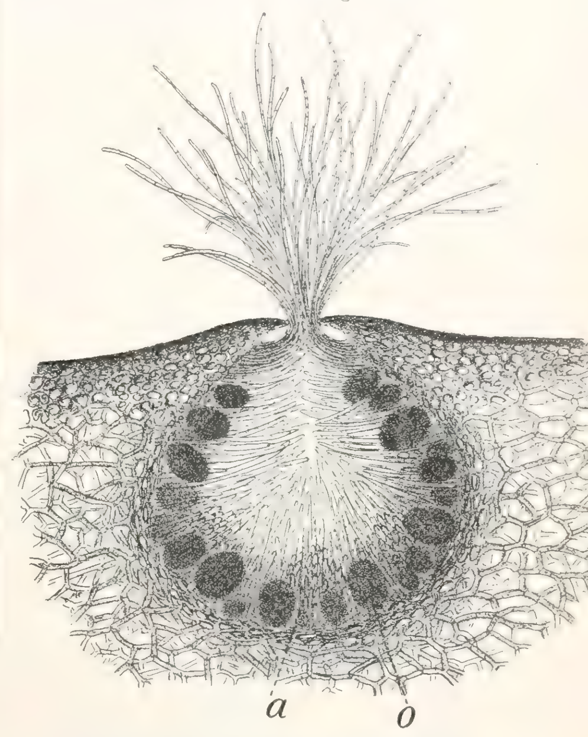


Fig. 64. Längsschnitt durch das Conceptakulum von Fucus. a Antheridien, o Oogonien.

Eine ungeschlechtliche Fortpflanzung gibt es bei Fucus nicht, die geschlechtliche ist dafür um so ausgiebiger. Die Sexualorgane stehen in sogenannten Konzeptakeln. Diese gleichen in ihrer Entstehung vollkommen den Haargruben, nur tragen sie (Fig. 64) auf ihrer Innenseite neben mancherlei Haarbildungen die Oogonien und Antheridien. Beide Organe können, je nach der Spezies, in demselben Konzeptakulum vereinigt sein, oder aber sich auf verschiedenen Individuen der Fucuspflanze vorfinden.

Die Oogonien sind kugel- bis eiförmige Zellen (Fig. 65), die mit einem Stiel der Konzeptakelwandung ansitzen. Ursprünglich enthalten sie einen Kern; er teilt sich aber später in acht und um jeden ballt sich ein Ei. Die Eier sind zunächst noch gegeneinander

abgeplattet. Sind sie annähernd reif, dann lösen sie sich, von der innersten Wandschicht des Oogons umgeben, von dem Stiel los (Fig. 65, 4), schlüpfen durch die Höhlung des Konzeptakulums und werden durch die an dessen Mündung befindlichen Fäden hinausgeleitet. Liegen die Pflanzen bei Ebbe frei, wie das ja vermöge des oben erwähnten Standortes häufig ist, so sammeln sich die ausgetretenen Oogonmassen vor der Konzeptakelmündung in Form von Häufchen an, die noch von Schleim umgeben sind. Tritt dann bei steigendem Wasser die Wiederbenetzung ein, so wird die umhüllende Oogonmembran gesprengt (Fig. 65, 5), und die Eier gelangen, völlig zur Kugel gerundet, ins Wasser. Hier schweben sie, weil sie annähernd das spezifische Gewicht des Wassers haben.

Fig. 65. Fucus. 1 Antheridienstand, 2 Antheridien in der Entleerung, 3 reifes Oogon noch auf dem Stiel, 4 dasselbe losgelöst, 5 Befreiung der Eier, 6 Ei im Moment der Befruchtung, sp Spermatozoiden, st Stiel.

Die Antheridien stehen in großer Zahl auf verzweigten Fäden (Fig. 65, 1), welche der Konzeptakelwand angeheftet sind. Sie sind kleine, birnförmige Körper, welche sich ebenfalls von ihren Mutterfäden loslösen und aus der Konzeptakelöffnung herausgeführt werden. Nach der Benetzung entlassen sie zahlreiche kleine Spermatozoiden (Fig. 65, 2), welche noch die Form der Phaeosporeenschwärmer besitzen, aber ihren Chromatophor eingebüßt haben. Erhalten ist der Augenfleck, und an diesem sitzen die Geißeln.

Bei den zweihäusigen Formen kann man Eier und Spermatozoiden zunächst getrennt sammeln. Vereinigt man sie später in einem Uhrglas oder etwas Aehnlichem, so stürzen die Spermatozoiden in ungeheueren Mengen auf die Eizellen ein und bringen diese gelegentlich in rollende Bewegung. Bald aber dringt ein Spermatozoid in die Eizelle ein; dann wird die Zygote sehr rasch von den noch anhängenden Spermatozoiden gesäubert. Die Zygote keimt sofort in der oben geschilderten Weise.

Ascophyllum bildet im Oogon nur vier Eier aus; trotzdem werden zunächst acht Kerne gebildet, aber vier von ihnen degenerieren. Die im vegetativen Aufbau dem Fucus sehr ähnliche Pelvetia hat zwei Eier und sechs, Himanthalia ein Ei und sieben überzählige Kerne.

S a r g a s s u m - R e i h e. Alle Vertreter dieser Gruppe sind ausgezeichnet durch den Besitz einer dreiseitigen Scheitelzelle. Die Haldrys siliquosa ist in einer Ebene verzweigt, hat nur wenig abgeflachte Haupt- und Seitensprosse und erhielt ihren Namen von den schotenähnlichen, gekammerten Luftblasen. Die Cystosiren fallen besonders dadurch in die Augen, daß sie einen relativ kurzen und dicken Hauptsproß besitzen, von welchem dann lange, reich verzweigte Aeste ausgehen (Fig. 66, 1). Diese sind sehr mannigfaltig gestaltet und tragen die Konzeptakeln in fast alle Endverzweigungen eingesenkt (Fig. 66, 2).

Die S a r g a s s u m a r t e n sind dadurch berühmt geworden, daß sie an relativ wenigen aber langen Hauptachsen zahlreiche kurze Seitentriebe entwickeln. Jeder derselben bildet (Fig. 66, 3) zunächst einen blattähnlichen flachen Sproß (bsp), dann ein oder zwei kugelige gestielte Schwimmblasen (lbl) und endlich Sprosse mit Konzeptakeln (fspr).

Die Oogonien und Antheridien sind im wesentlichen dieselben wie bei Fucus. Jedoch wird in jedem Oogon immer nur ein Ei entwickelt; trotzdem sind auch hier in demselben ursprünglich acht Kerne vorhanden.

Neben den beiden genannten Gattungen gibt es noch viele andere, sehr mannigfaltig

differenzierte, die hier keine Erwähnung finden können.

Sargassum wächst besonders reichlich an den Küsten Westindiens, der Bahama-Inseln usw. Losgerissene Sprosse führt der Golfstrom in Mengen mit und häuft sie an Orten auf, wo mehrere Arme desselben sich

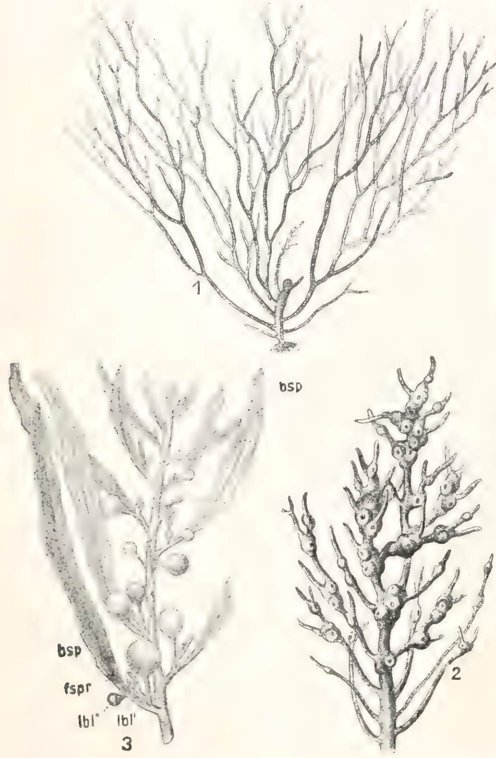


Fig. 66. 1 junge Pflanze von Cystosira barbata, 2 Fruchtsproß von Cystosira crinita, 3 Sargassum, Langtrieb, bsp Basalsproß, fspr Fruchtsproß, lbl Luftblase.

begegnen. Das ist dann die Sargassosee, welche zwischen Westindien und Nordafrika etwa das Gebiet zwischen dem 10. und 50. Grad nördlicher Breite und dem 20. und 90. Grad westlicher Länge einnimmt. Seit Kolumbus ist sie viel umfabelt, in Wirklichkeit ist sie unendlich harmlos.

VI. Rhodophyceae.

Diese große Gruppe, die man auch als Florideen bezeichnet, ist durch alle Meere aller Zonen verbreitet. Es hat den Anschein, als ob sie in den wärmeren Meeren etwas reichlicher vertreten seien, aber auch die kälteren beherbergen der Formen genug. Florideen meiden salzärmere Meere wie z. B. die Ostsee keineswegs. Einige von ihnen sind sogar in das Süßwasser eingewandert. Dahin gehört z. B. Batrachospermum, das stehende wie auch fließende Süßwässer bewohnt. Ferner wären zu nennen Lemanea-, Tuomeya-, Chantransia-, Delesseriaarten, die in kalten rasch fließenden Bächen verschiedener Weltgegenden sich angesiedelt haben.

Die Zellen der Florideen beherbergen in den meisten Fällen einen einzigen Zellkern. Dort aber, wo die ersteren sich erheblich vergrößern, wird auch die Zahl der Kerne vermehrt. Die Chromatophoren sind plattenförmig mit vielfach sehr unregelmäßigen Umrissen, aber auch Linsenformen usw. sind nicht selten. Allbekannt ist, daß die typische Farbe der Florideen ein intensives Rot ist. Sie wird hervorgerufen durch das Phycoerythrin, einen kristallisierbaren Eiweißkörper. Dieser ist aber nicht allein vorhanden, sondern neben demselben ist Chlorophyll gegeben. Der rote Farbstoff überdeckt den grünen. Zerreibt man die Algen in Wasser, so werden die Zellen mehr oder minder grün, der rote Farbstoff geht in Lösung. Neben jenem roten kommen aber auch noch vielfach blaue und andere Farbstoffe vor und diese bedingen es, daß die Farbe unserer Algen von dem typischen Rot vielfach abweicht. Das ist besonders der Fall bei Formen, welche an der Meeresoberfläche leben und regelmäßig auch bei den Süßwasserformen, z. B. erscheint Batrachospermum blaugrün.

Die Rhodophyceae bilden in der geschlechtlichen Fortpflanzung Carpogone, das sind flaschenförmige Zellen mit mehr oder weniger langem Fortsatz — der Trichogyne. Diese wird durch unbewegliche, nackte männliche Zellen — Spermatien — befruchtet. Nackt und unbeweglich sind die nach der Befruchtung entstehenden Carposporen, ebenso wie die ungeschlechtlichen Fortpflanzungszellen, die Mono- und Tetra-Sporen.

a) Bangiales. Diese Gruppe enthält nur eine kleine Familie, die Bangiaceae. Die Carpogone besitzen so kurze Fortsätze, daß man kaum noch von einem Trichogyn reden kann. Thallusbau sehr einfach.

Bei Erythrotrichia haben wir Sohlen, von welchen sich meist unverzweigte Fäden erheben. Diese bestehen aus einer einzigen Zellreihe, doch sind einige Längsteilungen in ihnen nicht selten. Bangia stellt ebenfalls unverzweigte Fäden oder Borsten dar, die aber durch Längs- und Querteilungen vielzellig werden (Fig. 67, 1). Porphyra endlich entwickelt in der Jugend auch einfache Fäden, sehr zeitig aber verbreitert sie sich zu ein- oder zweischichtigen Flächen, welche Handgröße erreichen können.

Die einzelne Zelle besitzt ein Sternchromatophor mit einem zentralen Pyrenoid. Das Chlorophyll wird überdeckt durch wasser-

lösliche rote, blaue usw. Farbstoffe; je nach der Mischung dieser wechselt dann die Farbnuance der ganzen Pflanze.

Die ungeschlechtliche Fortpflanzung erfolgt durch nackte Monosporen. Inhaltsreiche Zellen der Fäden oder Flächen werden durch feste Wände ein oder zweimal geteilt, dann schlüpft der Inhalt heraus. Im allgemeinen sind die Monosporen kugelig gerundet bei Berührung mit einem Substrat aber können sie auch ziemlich ausgiebige amöboide Bewegungen ausführen. Sie keimen nach kurzer Zeit zu neuen Pflanzen aus.

In der geschlechtlichen Fortpflanzung werden als männliche Organe Spermatien gebildet. Das sind nackte kugelige, fast farblose Zellen, die aber jeglicher Eigenbewegung entbehren. Sie entstehen durch vielfache Teilungen aus fast allen Zellen des Thallus (Fig. 67, 2).

Die weiblichen Zellen, wir wollen sie Oogonien nennen (andere Autoren sprechen

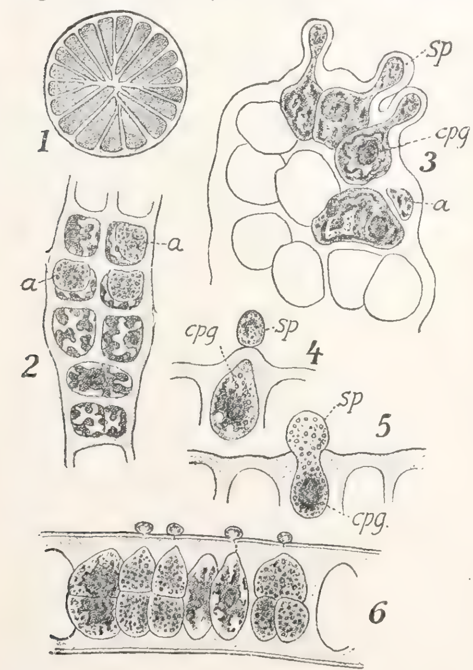


Fig. 67. 1 Bangia atropurpurea. Querschnitt des Thallus. 2 Erythrotrichia obscura mit Antheridien (a). 3 Dieselbe mit Carpogonen (cpg), welche durch Spermatien (sp) befruchtet sind. 4 Dieselbe; Carpogon (cpg) mit anhaftendem Spermatium (sp). 5 Dieselbe im Moment der Befruchtung. 6 Porphyra leucosticta; befruchtete und unbefruchtete Carpogone.

von Carpogonen), entstehen dadurch, daß eine Anzahl von Thalluszellen sich etwas vergrößert, Reservestoffe speichert und dann kurze papillenartige Fortsätze, welche schwach gefärbt erscheinen, nach auswärts treibt (Fig. 67, 4). An jede Papille werden Spermatien durch die Wasserströmung getrieben, kleben dort fest, umhüllen sich mit einer Membran und verschmelzen dann unter Auflösung der trennenden Häute mit der Papillenspitze (Fig. 67, 5). Die Befruchtung dürfte in der üblichen Weise erfolgen. Nach derselben teilt sich die Zygote in mehrere Zellen und aus jeder einzelnen schlüpfen nackte Zellen — Carposporen — aus, welche unter amöboider Bewegung keimen.

Die Bangiales werden von vielen aber nicht von allen Autoren als die Vorläufer der Florideen betrachtet.

b) Florideae. Die Carpogone haben eine lange, wohlentwickelte Trychogyne. Die Formenmannigfaltigkeit der Florideen ist ganz außerordentlich, sie alle zu beschreiben ist ganz unmöglich. Deswegen greifen wir einige charakteristische Gruppen und Typen heraus.

Die Vegetationsorgane treten uns in drei Typen entgegen, die freilich auch Uebergänge zeigen.

I. Von einer Sohle, die natürlich dem Substrat aufliegt, erheben sich unregelmäßig aber reich verzweigte Fäden, die wie Ecto-

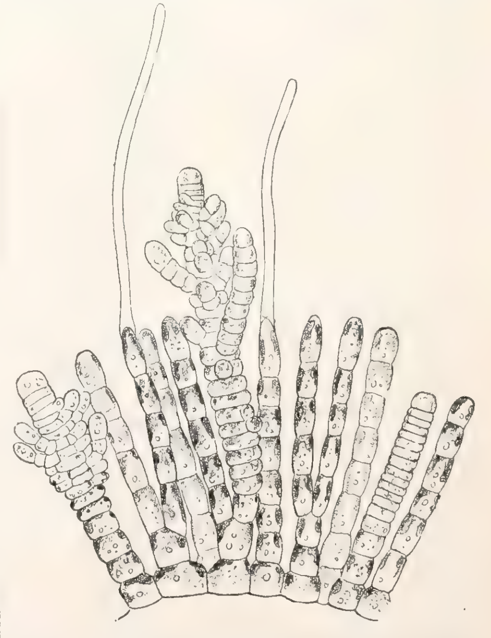


Fig. 68. Gloeosiphonia. Sohle mit jungen Sprossen.

carpus im Wasser fluten. Vielfach ist nur eine Reihe von Zellen in den Sprossen vorhanden, ausgeprägte Scheitelzellen fehlen (vgl. Fig. 80 Callithamnion).

II. Eine Sohle trägt aufrechte, verzweigte oder unverzweigte Fäden (Fig. 68). Von diesen

oder zwischen ihnen erheben sich derbere Aeste, welche mit Hilfe einer Scheitelzelle ein ausgiebiges Längenwachstum erfahren, und auch eine größere Zahl gleichgestalteter Seitenäste produzieren, das sind die Zentralfäden (Zentralachsen), welche aus einer Reihe derber Zellen bestehen (Fig. 68). Jede von diesen sogenannten Gliederzellen entsendet dann meist vier Wirteläste (Fig. 69). Die unterste und älteste Zelle jedes der letzteren, die Basalzelle (bz), trägt dann wieder eine außerordentlich große Zahl von Auszweigungen, welche alle annähernd auf gleicher Höhe endigen, und auch seitwärts aneinander schließen (Fig. 69, 3). Auf diesem Wege entstehen Ringe um die Zentralachsen, welche von den vier Basalzellen gehalten werden. Sind die Gliederzellen der zentralen Achsen lang, so bleiben die Ringe in vertikaler Richtung getrennt und die Algensprosse erhalten dadurch ein perlschnurförmiges Aussehen (Fig. 70). Da meistens ein dünner Schleim solche Florideen überzieht und deren Aeste leicht zusammenhält, ähneln sie dem Froschlaich (Batrachospermum). In vielen Fällen (Fig. 69, 2) wird der Schleim fester, die Enden der Wirteläste schließen nicht bloß seitlich fest aneinander, sondern die Ringe rücken auch in vertikaler Richtung zusammen, und so entsteht dann eine feste Rinde (r), die den Wirtelaufbau äußerlich nicht mehr erkennen läßt.

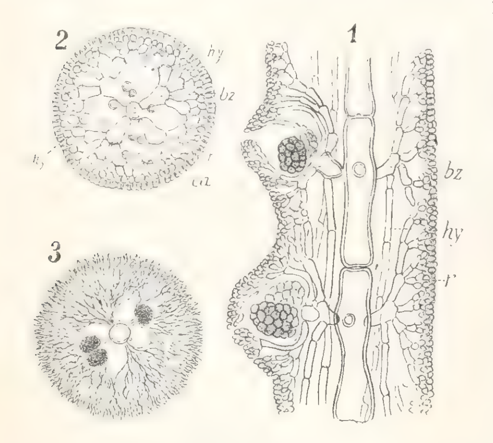


Fig. 69. 1 Längsschnitt durch den Sproß von Calosiphonia, 2 Querschnitt durch den Sproß von Gloeosiphonia, 3 Dasselbe von Thuretella. ca Zentralachse, bz Basalzelle der Wirteläste, r Rinde, hy Hyphen.

Die Festigkeit solcher Formen wird dann oft noch erhöht durch Fäden (Hyphen hy), welche aus den Basalzellen entspringen und an den Achsenfäden entlang wuchern usw. Von den Basalzellen können auch Berindungen der Hauptachsen ausgehen usw.

III. Die Sohle treibt unmittelbar nebeneinander eine Anzahl derber Fäden (Fig. 71) diese legen sich fest aneinander und werden durch Gallerte verbunden. Indem sie sich verlängern, treiben sie nach allen Seiten auswärts gekehrte Aeste, die wiederum fest zusammen schließen.

Aeltere Sprosse solcher Florideen zeigen dann naturgemäß in ihrem Scheitel die Anordnung der Fäden, wie sie ungefähr Figur 72, 1 wiedergibt, sie wurde mit einem Springbrunnen verglichen. Die zentral gelegenen Fäden wachsen immer annähernd in der Richtung des Sprosses, geben aber seitwärts ständig Zweige ab, die sich nach auswärts biegen und schließlich eine horizontale Richtung erhalten. Da alle Elemente fest durch Gallerte verkittet werden, entstehen derbe Sprosse, an welchen man einen Zentralkörper (ck) eine Innen- (ir) und eine Außenrinde (ar) unterscheiden kann. Letztere ist am dunkelsten gefärbt und assimiliert. Diese Unterschiede treten besonders auf Querschnitten hervor (Fig. 72, 2). Die Festigkeit



Fig. 70. Batrachospermum. Habitusbild.

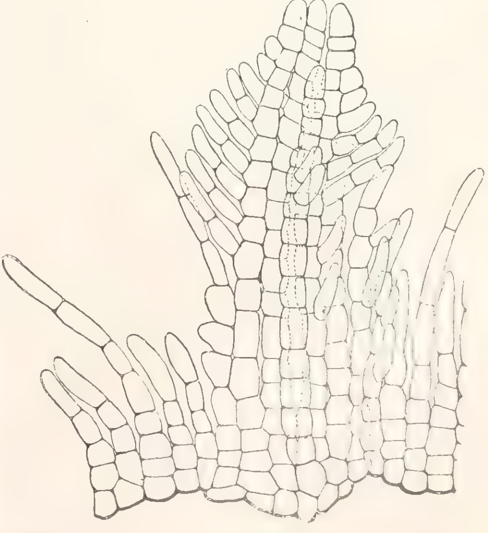


Fig. 71. Platoma. Sohle mit jungem Sproß.

wird auch hier noch durch Hyphen (h) erhöht, die zumal im Zentralkörper reichlich vorhanden sind. Diesem Typus gehören die derberen Florideen an, z. B. Chondrus, Gigartina, die ja auch den Namen Knorpeltange führen.

Der Bau des Thallus beweist im allgemeinen nichts für die Verwandtschaft der Florideen untereinander — alle 3 Typen können

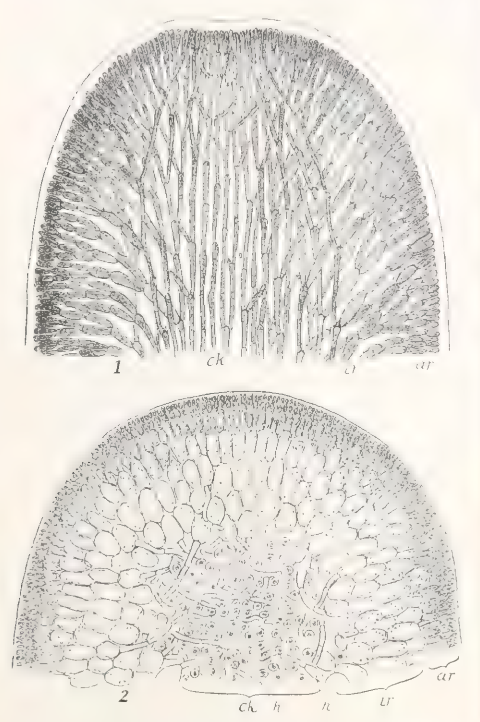


Fig. 72. Furcellaria. 1 Längs-, 2 Querschnitt durch den Scheitel. ar Außen-, ir Innenrinde, ck Zentralkörper, h Hyphen.

in derselben Familie vertreten sein. Die phylogenetische Zusammengehörigkeit beurteilen wir fast allein nach der Bildung der Carposporen. In einzelnen Gruppen, die wir später behandeln, gibt freilich auch der anatomische Bau schon Anhaltspunkte.

Wir unterscheiden folgende Hauptgruppen:

1. Nemalionales. Die sporogenen Fäden gehen niemals Verbindungen mit Zellen des Vegetationskörpers ein.

Die einfachste Floridee dürfte Chantransia sein (Fig. 73). Sie gehört dem Typus I an (S. 164).

Die ungeschlechtliche (Fig. 73, 2) Fortpflanzung erfolgt durch Monosporen. Einzellige Seitenäste tragen eine eiförmige Zelle, welche dicht mit Protoplasma gefüllt ist. Ihr Inhalt schlüpft aus und rundet sich kugelig ab. Ohne Zellulosemembran treibt er eine Zeitlang im Wasser. Kommt die Monospore mit einem festen Gegenstand in Berührung, so setzt sie sich auf diesem fest, umgibt sich mit Membran und wächst zu einer neuen Pflanze heran. Das scheint dann eine Geschlechtspflanze zu sein. Diese hat dieselbe Form wie die Monosporen tragende, läßt aber entweder Antheridien oder Carpogone entstehen. Die Sexualzellen sind auf verschiedene Individuen verteilt. Die Antheridien bilden Gruppen von auffallend kleinen Zellen — die Antheridienstände (Fig. 73, 1). Das sind nichts anderes wie vielfach verzweigte Sproßsysteme mit

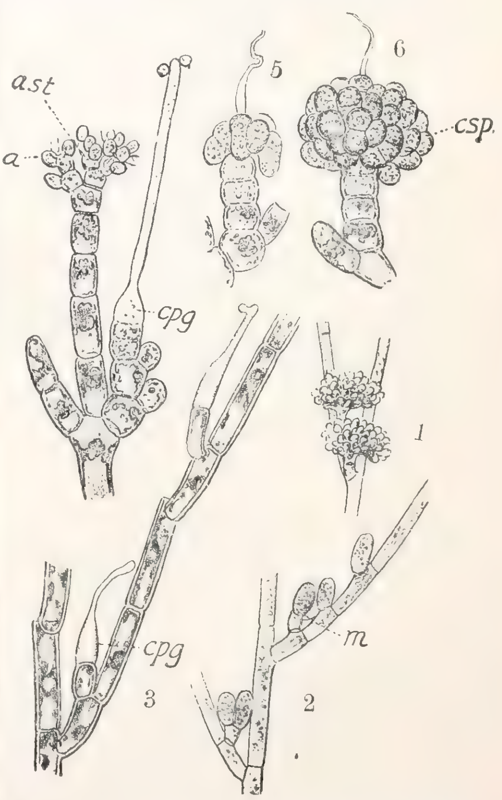


Fig. 73. 1—3 Chantransia corymbifera Thur. 1 Antheridienstände, 2 Zweig der Alge mit Monosporen (m), 3 Dasselbe mit Carpogonen (cpg), 4—6 Nemalion multifidum, 4 Zweig mit Antheridienstandast und Carpogon; letzteres mit Spermatien, 5, 6 Entwickelung der Carposporen (csp).

gestauchten Achsen. Am Ende jedes Zweigleins sitzt eine kugelförmige Zelle. Dieselbe ist ungefärbt und entläßt bei der Reife aus einem Riß ihren Inhalt, das Spermatium. Dasselbe ist ohne Geißeln auch ohne Zellhaut, es schwebt im Wasser.

Die Carpogone (Fig. 73, 3) sind ungefähr flaschenförmige Zellen mit recht langem Halse. Dieser Hals ist die Tricho-

gyne. Diese ist farblos. Chromatophore liegen im Bauch des Ganzen. Wasserströmungen treiben von den in großer Zahl gebildeten Spermatien mindestens eines an die Trichogyne, dort klebt es mit Hilfe von Schleim an der Spitze fest. Nun erhält auch das Spermatium eine Haut. Durch Auflösung der Wandungen zwischen der männlichen Zelle und dem Trichogyn entsteht ein Kanal, und durch diesen schlüpft der Inhalt aus dem Spermatium in die Trichogyne hinüber, um hier in normaler Weise die Befruchtung zu vollziehen. Nach derselben wird der Bauch des Carpogons durch einen Zellulosepfropf von der Trichogyne abgegliedert, und letztere geht zugrunde. Aus der Zygote, d. h. aus dem Bauch des Carpogons, sprossen Fäden hervor, die wir als *sporogene* bezeichnen wollen, und diese gliedern nun unter starker Anschwellung an ihren Enden inhaltsreiche Zellen ab. Das sind die Carposporen. Diese entlassen ihren Inhalt, der wiederum zunächst ohne Membran im Wasser schwebt, dann aber irgendwo strandet und zu einer neuen Pflanze auskeimt. Diese trägt wahrscheinlich wieder Monosporen.

Nemalion gehört dem Typus III an. Die Pflanzen sind so weich, daß man ihren fädigen Aufbau oft durch einfaches Zerdrücken erkennen kann. Monosporen oder irgend etwas Aehnliches sind nicht vorhanden. Geschlechtsorgane (Fig. 73, 4) sind dieselben wie bei Chantransia, jedoch stehen Antheridien und Carpogone an derselben Pflanze auf benachbarten Aesten beisammen.

Wieder anders bezüglich der Fortpflanzungsorgane verhält sich *Batrachospermum*. Die aufrechten, verzweigten Fäden der Sohle (Fig. 74, 1) tragen auf kurzen Seitenzweiglein Monosporangien, aus welchen dann natürlich Monosporen entleert werden. Das ist das sogenannte Chantransiastadium. Aus diesem entsteht erst das eigentliche Batrachospermum. Seitenäste der sogenannten Chantransien werden zu ziemlich derben Flächen, welche schon im frühen Jugendstadium eine Scheitelzelle erhalten und dann zu Sprossen mit Wirtelästen nach dem Typus II werden (Fig. 74, 2).

Die Wirteläste sind dann auch die Träger der Geschlechtsorgane. Die Antheridien sind kugelige farblose Ausstülpungen an den äußersten Verzweigungen der Wirteläste (Fig. 74, 3). Ursprünglich einkernig, werden sie kurz vor ihrer Reife durch Mitose zweikernig. Sie entlassen dann Spermatien, die natürlich auch die beiden Kerne behalten. Wasserströmungen treiben sie wie immer an das Carpogon, welches einem wenigzelligen Ast (Carpogonast) aufsitzt (Fig. 74, 4). Die Vereinigung mit der Trichogyne ist die übliche. Beide Kerne des Spermatiums können in die letztere eintreten, aber einer von ihnen geht zugrunde, der andere wandert in den Bauch des Carpogons und verschmilzt hier mit dem einzig vorhandenen Kern des ganzen Organs, dem Eikern. Nach der Vereinigung Bildung von sporogenen Fäden (sf Fig. 74, 4) und



Fig. 74. *Batrachospermum*. 1 Jugendform mit Monosporen, 2 Jugendform mit den ersten wirtelig verzweigten Langtrieben, 3 Zweig mit Antheridien (a), 4 Carpogonast, sf sporogene Fäden, hf Hüllfäden derselben.

von Carposporen. Um letztere werden einige wenige Hüllfäden (hf) gebildet.

Dermonea hat einen ähnlichen Bau wie Nemalion. Es unterscheidet sich aber von allen hier bisher erwähnten Formen dadurch, daß die sporogenen Fäden nicht kurz bleiben, sondern (Fig. 75) lang auswachsen,

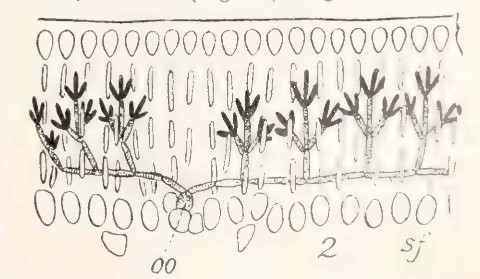


Fig. 75. *Dermonea*. Hell gehalten das Gewebe der Pflanze, dunkel die von dem befruchteten Carpogon (oo) ausgehenden sporogenen Fäden (sf).

zwischen den Gewebezellen der Geschlechtspflanzen hindurchkriechen und erst weit von dem Carpogon oder der Zygote die Carposporen entwickeln.

2. Cryptonemiales. Die sporogenen Fäden, meist stark entwickelt, werden in gewissen Nährzellen (Auxiliarzellen) des Vegetationskörpers verankert..

Dermonema bildet den willkommenen Uebergang zu der hochberühmt gewordenen Dudresnaya (zu Typus II gehörig). Sie besitzt keine ungeschlechtliche Fortpflanzung. Die Antheridien bieten nichts Neues. Die Carpogone sitzen wie bei Batrachospermum auf kurzen Carpogonästen (Fig. 76) und diese ihrerseits sind wieder an Wirteläste, welche der Hauptachse (ha) entspringen, angeheftet. Befruchtung wie üblich. Nach derselben brechen aus der Zygote sporogene Fäden (sf) hervor; aber diese bilden nun nicht wie sonst üblich sofort Carposporen, sondern sie verlängern sich ganz außerordentlich, und gehen Verschmelzungen mit Zellen ein, die wir als Auxiliarzellen bezeichnen. Das sind sehr inhaltsreiche, zumal mit Reservestoffen gefüllte Zellen, die dem Beobachter ohne weiteres auffallen. Zunächst vereinigen sich die sporogenen Fäden mit 1 bis 2 Zellen, welche im Verband des Carpogonastes (a_1 a_2 Fig. 76) liegen. Dann aber wachsen sie weiter hinaus zwischen den Wirtelästen hindurch, finden wiederum Auxiliarzellen (a_3 oder a_4), gehen wieder mit diesen Verbindungen ein und können, nachdem diese erfolgt ist, immer noch weiter wachsen auf andere Auxiliarzellen hin (a_5, a_6). Die sporogenen Fäden legen sich an die Auxiliare an; an der Berührungsstelle wird die Wand aufgelöst, das Protoplasma fließt durcheinander, vollkommen getrennt aber bleiben die Kerne und niemals tritt eine Vereinigung des Auxiliarkernes, wie wir ihn kurz nennen wollen, mit einem sporogenen ein. Dieser bleibt immer in dem vom sporogenen Faden stammenden Teil der Fusionszelle liegen (bei a_3, a_6 usw). Das Ganze stellt sich dar als eine Verankerung der sporogenen Fäden in den Auxiliarzellen zur Ernährung, nicht aber als ein Sexualakt, wie man früher wohl glaubte.

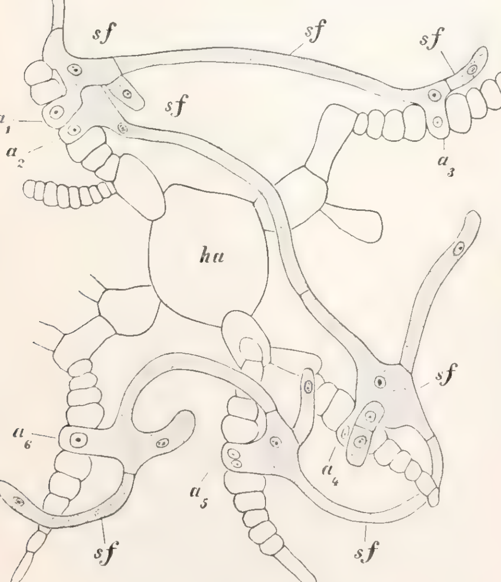


Fig. 76. Dudresnaya coccinea. Vegetative Sprosse hell, sporogene Fäden (sf) dunkel, s Spermatium, t Trichogyne, a_1 a_2 usw. Auxiliarzellen, ha Hauptachse.

Sind die sporogenen Fäden mit den Auxiliarzellen verbunden, dann werden aus ihnen in unmittelbarer Nähe der ersteren (bei a_4) kurze Fäden getrieben, welche dann ihrerseits die Sporen bilden.

Schon in der Gattung Dudresnaya sind die sporogenen Fäden verschieden, nicht minder ist es die Lage der Auxiliarzellen. Das wiederholt sich natürlich in verwandten Gattungen und Familien. Darüber soll hier nicht weiter berichtet werden. Dagegen wollen wir eine Familie hervorheben, die man einigermaßen, wenn auch nicht ohne Bedenken, der eben behandelten Gruppe anschließen kann, das sind die Corallinaceae, ausgezeichnet durch ihre Kalkinkrustationen, die ihre Erhaltung im fossilen Zustande unschwer ermöglichen. Daher ist ihre Rückverfolgung bis ins Tertiär möglich.

Bei der Gattung Corallina erheben sich von einer Sohle zahlreiche aufrechte Sprosse, welche fiederig verzweigt sind, mit ungleicher Ausbildung der Fiederäste (Fig. 77, 1).

Stämme und Aeste der Corallina zeigen auf dem Scheitel ungefähr den Bau des Typus III, den wir auf Seite 165 schilderten, und dem entspricht es, daß wir in den älteren Regionen den Zentralkörper mit den längslaufenden Fäden von den radialen Rindenelementen leicht unterscheiden. Diese lagern in allen ihren Zellwänden kohlensauren Kalk ein, und so resultiert nicht bloß ein Kalkmantel, der den Zentralkörper umgibt, sondern auch eine eigenartig rosenrote Färbung, welche — allen Corallineen eigen — aus der Eigenfarbe der Zellen und deren Ueberlagerung durch den Kalk hervorgeht.

Haupt- und Seitensprosse bilden an gewissen Stellen und in gewissen Abständen keine Rinde, sondern nur Längsfäden. Diese verkalken nicht und so entstehen nicht inkrustrierte, bewegliche Regionen — Gelenke, die schon äußerlich ohne weiteres hervortreten. Die Fortpflanzungsorgane sitzen an den Enden der Zweige (Fig. 77, 2) in besonders geformten flaschenförmigen Gebilden — Konzeptakeln — (Fig. 77, 3) und zwar sind Antheridien und Carpogone jeweils in getrennten Organen dieser Art zu finden. Antheridien und Spermatien sind eigenartig aber hier nicht zu

behandeln. Die Carpogone stehen zahlreich und dicht gedrängt auf dem Boden des Conceptaculums. In unmittelbarer Nähe eines jeden von ihnen findet sich die zugehörige Auxiliarzelle. Befruchtet werden nur einige wenige der mittleren Trichogyne und dann vereinigen sich die sehr kurzen sporogenen Fäden — man kann sie kaum noch so nennen — mit den nächsten Auxiliarzellen. Dieser Prozeß aber greift weiter um sich, die sporogenen Zellen entsenden Lappen nach allen Richtungen und vereinigen sich allmählich

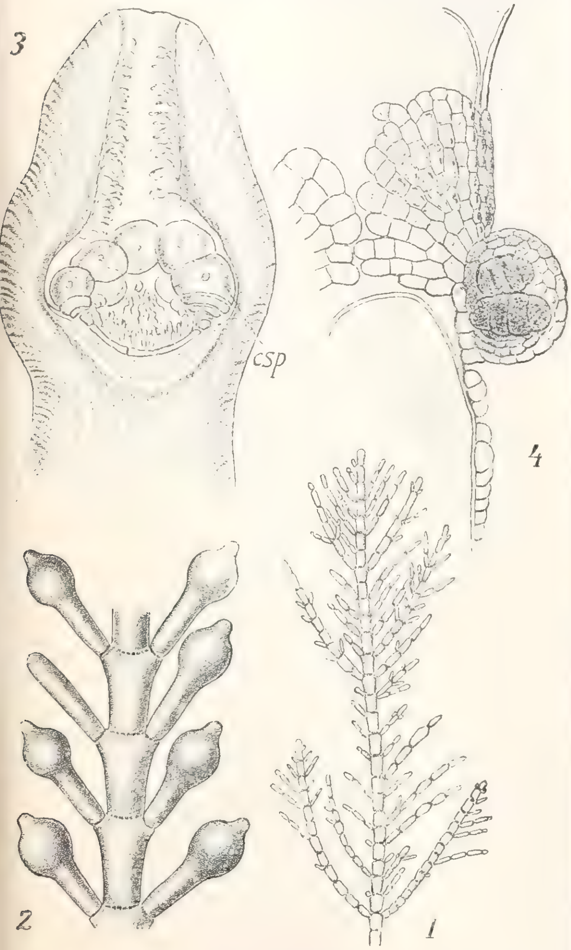


Fig. 77. 1—3 Corallina, 1 ganzer Sproß, 2 männliche Konzeptakeln, schwach vergrößert, 3 weibliches Conceptaculum im Längsschnitt, stärker vergrößert, 4 Melobesia auf einem Algenfaden, csp Carposporen.

mit allen im Conceptaculum vorhandenen Auxiliaren. So entsteht dann ein Fusionskuchen, der den Grund des Conceptaculums bedeckt. Aus dem Rande desselben sprossen die Carposporen aus (Fig. 77, 3 csp), sporogene Kerne werden eben bis an den Rand jenes Gebildes vorgeschoben.

Bei vielfacher Uebereinstimmung im Verhalten der Fortpflanzungszellen sind die vegetativen Organe der Corallinaceae in den einzelnen Gattungen sehr verschieden, und auch die Arten variieren derart, daß sie den Systematikern viel Kummer machen. Lithothamnion besitzt zunächst Sohlen, die derb krustenförmig werden und aus diesen erheben sich dann unregelmäßig knorrige, hirschgeweihähnliche usw Sprosse (Fig. 78) von verschiedener Länge. Da sie meist

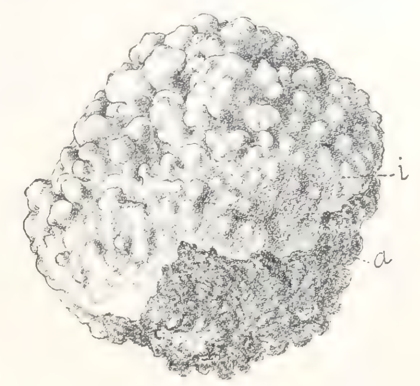


Fig. 78. Lithothamnion. Jüngere Kruste (i) auf einer älteren Knolle (a).

auf annähernd gleicher Höhe endigen, ergeben sich oft korallenähnliche Körper. Jüngere Lithothamnien siedeln sich gern auf älteren, durch Wasserbewegung abgerollten Knollen an. Handgroße Platten bildet Lithophyllum, in kleinen Krusten (Fig. 77, 4) überzieht Melobesia Pflanzen, Steine usw.

Die Corallinaceae sind in wärmeren und kälteren Meeren vertreten, Corallina selber geht in die Brandung. Melobesia überzieht in dieser Algen und Gestein, geht aber auch ziemlich tief auf den Meeresboden hinab. Die Lithophyllen und Lithothamnien sind Algen der Tiefe, sie sammeln sich oft in großen Massen an und bilden dann ausgedehnte Bänke, so z. B. die altbekannten Secchen im Golf von Neapel.

Als letztes Beispiel aus der Gruppe der Cryptonemiales wählen wir Gloeosiphonia. Die Pflanze hat typische Zentralfäden mit Wirtelästen. An den Zentralachsen sitzen die Procarpien (Fig. 79, 1). Darunter versteht man besondere Zweigsysteme, in welchen ein Carpogonast mit einer Auxiliare in charakteristischer Weise kombiniert ist. Die Sache ist hier besonders übersichtlich. Ein Seitenzweig des Zentralfadens trägt als erstes Zweiglein den Carpogonast, an dem sich hier (aber nicht überall) die hypogyne Zelle (hz) unter dem Carpogon abhebt, ohne daß man ihre Funktion erkannt hätte.

Der Procarpzweig trägt einige sterile Seitenäste und biegt kurz unter der Spitze um. Die in der Biegung gelegene Zelle schwillt gewaltig auf und stellt die Auxiliarzelle dar. Nach der Befruchtung entsendet (Fig. 79, 2) die Oospore (oosp) einen sporogenen Faden (sf) gegen die Auxiliarzelle, befördert einen Kern (sk) in diese und nun be-

ginnt dasselbe Spiel wie bei Dudresnaya. Der Auxiliarkern wird verdrängt, der sporogene bildet die Carpospore.



Fig. 79. Gloeosiphonia. 1 Procarpium im Moment der Befruchtung, 2 Dasselbe nach Eintritt eines sporogenen Kerns in die Auxiliarzelle, tr Trichogyne, hz hypogyne Zelle, cpa Carpogonast, az Auxiliarzelle, ak Auxiliarkern, sk sporogener Kern, sf sporogener Faden.

3. Ceramiales. Carpogonäste und Auxiliarzellen stehen paarweise beisammen, zu einem Procarpium vereinigt. Sporogene Fäden auf ein oder wenige Zellen reduziert.

Gloeosiphonia leitet von der vorigen Gruppe leicht hinüber zu Callithamnion corymbosum (Fig. 80). Die Wachstumsweise desselben ist keine wesentlich andere wie die von Chantransia, nur sind die ganzen Pflanzen erheblich größer. Antheridien normal.

An den großen Gliederzellen der Aeste treten seitlich zwei Ausstülpungen hervor, die wir gleich als Auxiliarmutterzellen bezeichnen wollen (amz Fig. 80, 1). An einer derselben bildet sich ein Carpogonast (cpa), der aus drei sterilen Zellen besteht, welche ihrerseits das Carpogon (cpg) mit seiner langen Trichogyne auf ihrem Scheitel tragen. Der Carpogonast aber ist nicht aufgerichtet, sondern er legt sich quer über die große Gliederzelle, welche die Auxiliarmutterzellen trägt, gleich als ob er diese miteinander verbinden wollte (Fig. 80, 1, 2). Diese Kombination von Carpogonast und Auxiliarzellen nennen wir das Procarpium. Aus dem normal befruchteten Carpogon entstehen wieder sporogene Fäden. Diese aber sind hier (Fig. 80, 2) nicht mehr langgestreckt, sondern relativ kurz; es fällt sofort auf, daß dieselben nach zwei Richtungen hin divergierend auf je eine Auxiliarmutterzelle zuwachsen. Diese sind inzwischen in je eine Basalzelle (bz) und in die eigentliche Auxiliarzelle (az) gegliedert worden.

Letztere treiben kurze nasenartige Vorstülpungen, die gegeneinander gekehrt sind und an diese legen sich kleine sporogene Zellen, die letzten Enden der sporogenen Fäden. Figur 80, 2 zeigt das; in ihr ist aber der Carpogonast ein wenig zurückgerückt, um die ganzen Zusammenhänge erkennen zu lassen.

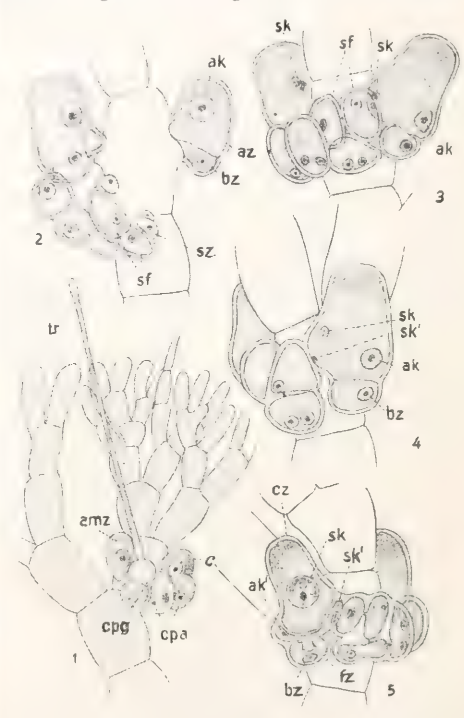


Fig. 80. Fruchtentwickelung bei Callithamnion corymbosum. 1 Zweig mit unbefruchtetem Procarp. 2 Prokarp nach der Befruchtung; Carpogonast mit sporogenen Zellchen (sz) durch Druck losgelöst. 3 Dasselbe nach Eintritt des sporogenen Kernes und nach dessen Teilung. 4 Dasselbe; Wanderung des einen sporogenen Kernes. 5 Dasselbe nach Bildung der Fußzelle. cpa Carpogonast. amz Auxiliarmutterzelle. az Auxiliarzelle. bz Basalzelle. fz Fußzelle. cz Zentralzelle. sf sporogener Faden. sz sporogene Zelle. sk sporogener Kern. ak Auxiliarkern.

Nachdem sich die sporogenen Zellen an die Nasen der Auxiliarzellen angelegt haben, wird die Wandung zwischen beiden aufgelöst und nun tritt eine seltsame Erscheinung auf. Der Inhalt der sporogenen Zellen, vor allen Dingen deren Kerne treten in die Nasen der Auxiliarzellen ein und dann

werden diese wieder geschlossen. Der eingedrungene sporogene Kern (sk Fig. 80, 3) teilt sich in zwei und gleichzeitig rückt der Kern der Auxiliarzelle aus der dominierenden Stellung, die er im Zentrum seiner Zelle inne hatte, heraus in die untere Ecke. Seinen Platz nimmt einer der sporogenen Kerne ein (sk Fig. 80, 4 und 5), der unter bedeutender Vergrößerung die Dimensionen des ursprünglichen Auxiliarkernes annimmt. Der zweite sporogene Kern bleibt an der Basis der Auxiliarzelle liegen und vergrößert sich nicht. Später entsteht in der Auxiliarzelle ziemlich nah an deren Basis eine Querwand und gliedert eine schmale Fußzelle (fz) ab, welche den Auxiliarkern und den zweiten sporogenen Kern beherbergt. Die obere große Zelle, die Zentralzelle (cz Fig. 80, 5), welche auf diesem Wege entstand, enthält somit nur den zweiten sporogenen Kern. Der hat gewiß auch etwas Plasma mitgebracht, aber die Hauptmasse der ihn umgebenden Zellsubstanz entstammt der Auxiliarzelle. So haben wir hier die seltsame Erscheinung, daß der sporogene Kern eine Herrschaft über ein ihm ursprünglich fremdes Plasma ausübt. Man kann das auch als Parasitieren bezeichnen. Aus der Zentralzelle gehen dann durch weitere Teilungen die Carposporen hervor.

Fig. 81. Stück eines Ceramiumsprosses. ca Zentralachse.

Hierher gehören dann weiter die Plumaria-, Antithamnion- und Ptilota-Arten, die alle durch eine sehr zierliche fiedrige Verzweigung auffallen und endlich die Gattung Ceramium selbst, die in zahlreichen Formen auftritt und oft schon mit bloßem Auge an den Querbinden erkannt wird, die ihre Sprosse zeigen. Die Zellen der Hauptsprosse sind außerordentlich groß (ca Fig. 81). Wo zwei Gliederzellen derselben zusammenstoßen, sind sie von einer kleinzelligen Binde aus dunkel gefärbten Zellen umgeben, die nichts anderes ist, als eine Gruppe von Wirtelästen, deren Glieder nicht gestreckt werden. Bei gewissen Ceramiumarten sind die Gliederzellen so kurz, daß die Binden sich berühren.

Die Verkürzung der sporogenen Fäden und die Kombinierung der Carpogonäste mit den Auxiliarzellen ist noch viel weiter getrieben in der Familie der Polysiphoniaceae. Diese Pflanzen bilden ziemlich große, reich verzweigte Büsche, welche an ihren Sprossen seitlich zahlreiche verzweigte Haare tragen (Fig. 83), die man vielleicht nicht ganz mit Unrecht als Blätter bezeichnet hat. Ihren Namen hat die Pflanze deshalb erhalten, weil ihre Sprosse bei schwacher Vergrößerung ausschauen, als ob sie aus zahlreichen Röhren zusammengesetzt wären. In Wirklichkeit handelt es sich etwa um folgendes. Die Polysiphonien wachsen mit einer Scheitelzelle, und diese gliedert, wie aus der Figur 83, 1 ersichtlich ist, annähernd scheibenförmige Segmente ab. Diese Segmente werden durch gesetzmäßig aufeinander folgende Längswände aufgeteilt, und wir erhalten nun (Fig. 82) eine zentrale Zelle (ca) und eine

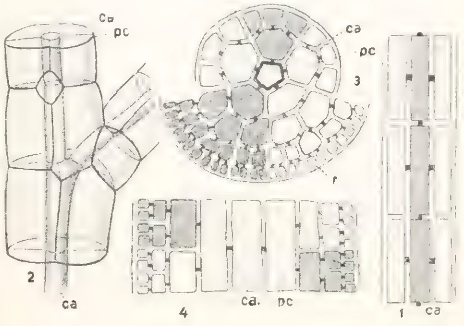


Fig. 82. Polysiphonia, 1 schematischer Längsschnitt. 2 Dasselbe Sproßstück, durchsichtig gemacht. 3 Quer-, 4 Längsschnitt einer sogenannten berindeten Polysiphoniacee. ca Zentralachse. pc Perizentralen.

Anzahl von sogenannten Perizentralzellen (pc). In den einfachsten Fällen sind deren nur vier vorhanden (Fig. 82,2), in anderen sind es mehrere, ja viele in mehreren Lagen übereinander, dann spricht man von Berindung (Fig. 82, 3, 4).

Wenn man nun die Lage der Tüpfel untersucht, welche die einzelnen Zellen verbinden, so ergeben sich die in Figur 82 schematisch dargelegten Beziehungen. Tüpfelverbindungen sind immer vorhanden zwischen der Achse und den sie umgebenden Perizentralzellen, soweit sie ein und demselben Segment entstammen. Perizentralzellen aus verschiedenen Segmenten sind nicht miteinander verbunden. Und dort, wo mehrere Lagen von peripheren Zellen gegeben sind, sind immer nur gewisse radial von der Achse ausstrahlende Zellen miteinander verkettet,

mit anderen Nachbarn aber fehlt die Verbindung ganz. Offenbar sind die genetisch zusammengehörenden Zellen durch Tüpfel verkettet. Das bedeutet aber nichts anderes, als daß die Perizentralen gestauchte Wirteläste sind.

Die zwischen heterogenen Zellen und Wirteln naturgemäß zunächst fehlende Tüpfelverbindung wird später noch hergestellt, besonders zwischen den übereinander stehenden Perizentralen, welche aus zwei benachbarten Segmenten hervorgingen. Zu dem Zweck werden von den oberen Perizentralen

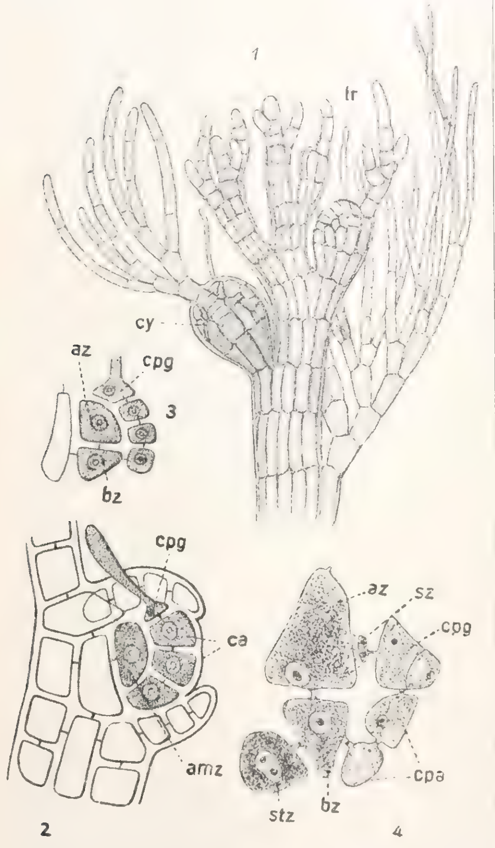


Fig. 83. 1 Polysiphonia nigrescens, Sproßspitze mit jungen Cystocarpien, 2 und 3 Cystocarpien von Rhodomela im Längsschnitt, 4 Procarp von Dasya nach der Befruchtung. cy Cystocarpien, ca Carpogonast, cpg Carpogon, amz Auxiliarmutterzelle, az Auxiliarzelle, bz Basalzelle, tr Trichogyne, sz sporogene Zelle, stz sterile Zelle.

an der Basis kleine Zellen abgegliedert, welche dann mit den unter ihnen liegenden verschmelzen. Ueber Einzelheiten sind die Handbücher nachzusehen, allwo auch zu lesen steht, daß die Familie der Rhodomeleen bezüglich der Haar- und der Blattbildung, bezüglich der Differenzierung ihrer Achsen usw. eine ungeheuere Mannigfaltigkeit aufweist. Durch Verwachsung der oben geschilderten Sprosse, durch Reduktion gewisser Teile usw. kommen die seltsamsten und interessantesten Formen zustande.

Die Antheridienstände sind bei den Polysiphonien etwas schärfer ausgeprägt, sie stellen keulige oder zylindrische Körper dar, welche durch sehr regelmäßige Verzweigung außerordentlich kleiner Aeste gebildet werden. Die Endzellen dieser Aestchen sind auch hier wieder die Antheridien. Der ganze Stand ist an der Basis eines haarähnlichen Blattes angeheftet. Das alles ist nichts Besonderes. Sehr eigenartig aber sind die Prokarpien in dieser Gruppe. Wiederum an der Basis der Haarblätter (Fig. 83, 1) finden wir eine mehr oder minder starke Anschwellung, aus welcher dann die Trichogyne nach oben lang herausragt. Ein solches Gebilde zeigt (Fig. 83, 2) im Zentrum des Ganzen eine Auxiliarmutterzelle (amz) und an dieser inseriert, einen dreizelligen Carpogonast (ca), welcher auf seinem Scheitel das Carpogon mit der Trichogyne trägt. Die Auxiliarmutterzelle sitzt einer Zentralzelle seitlich an. Dieser ganze Zellkomplex aber wird nun umhüllt von einem Becher, welcher durch Wachstum und Teilung aus den benachbarten Perizentralzellen hervorgeht.

Nach der Befruchtung ist die Weiterentwickelung dieses Prokarpiums im Prinzip dieselbe wie bei Callithamion. Die Auxiliarzelle wird genau wie dort durch eine Querwand abgegliedert (Fig. 83, 3). Und mit der Auxiliarzelle vereinigt sich dann eine kleine sporogene Zelle (sz Fig. 83, 4), welche von der Basis des befruchteten Carpogoniums ihren Ursprung nimmt. Der sporogene Faden ist also hier auf ein einziges Zellchen reduziert. Wir schildern nicht alle Einzelheiten, ist doch die Einwanderung des sporogenen Kerns, die Abgliederung der Fußzelle, die Entwickelung der Zentralzellen usw. völlig die gleiche wie bei Callithamnion.

Die aus den Perizentralen gebildete Hülle um das Procarpium wächst nach der Befruchtung weiter und umhüllt auch die Carposporen. Dann spricht man hier wie in anderen Familien von einem Cystocarpium.

Delesseriaceae. Diese Familie wird repräsentiert durch sehr zierliche Formen. Der Thallus ist fast immer flächenförmig entwickelt und vielfach gerade in dieser Familie durch seine schöne rote Färbung ausgezeichnet.

Nitophyllum bildet zarte breite Flächen ohne Rippen. Delesseria im weitesten Sinne stellt vielfach laubähnliche Gebilde dar (Fig. 94), an denen man Mittel- und Seitenrippen ohne Schwierigkeiten erkennt. Die Sprosse wachsen mit einer Scheitelzelle (Fig. 85), die aus dieser gebildeten Segmente zerfallen in eine mittlere und zwei Seitenzellen. Dann folgen weitere Teilungen,

die am leichtesten aus Figur 85 zu ersehen sind, und bei genauerer Betrachtung ergibt sich, daß auch diese scheinbar abweichenden Formen aufgefaßt werden können oder gar müssen als Sprosse mit einer zentralen Achse, welche an jedem Glied zwei einander opponierte Wirtel trägt.

Die Procarpien sind in das Laub eingesenkt, aus ihnen entstehen Cystocarpien mit einer



Fig. 84. Delesseria sanguinea (Hydrolapathum).

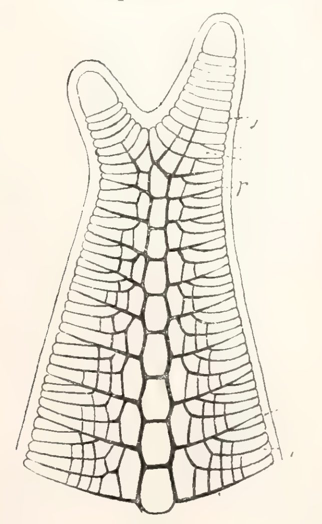


Fig. 85. Scheitel von Caloglossa (Delesseria).

Oeffnung, welche vielfach erheblich anschwellen und über das Laub als Pusteln hervorragen.

Delesseria sanguinea besitzt besondere kleine Fruchtäste mit zahlreichen Procarpien, nur eines von diesen entwickelt sich weiter und liefert ein stark aufgeschwollenes Cystocarp, das einem ziemlich dünnen Stiele aufsitzt.

4. Gigartinales. Die Procarpien erinnern in mancher Beziehung an die der Ceramiales, aber von der Auxiliarzelle gehen nach der Aufnahme der sporogenen Zellen meist ziemlich lange sporogene Fäden aus, welche in das Gewebe des Vegetationskörpers eindringen und Haufen von Carposporen bilden. Hierher gehören meist derbe Knorpeltange, z. B. Gigartina, Chondrus usw. Formen, welche auch die in der Technik bekannten Carrageen liefern.

Bei Chondrus sitzen die Carposporen in Pusteln über die oberen Teile des Thallus zerstreut.

Bei Gigartina werden derbe Zotten auf der Oberfläche des hirschgeweihartigen Thallus gebildet und in diesem entstehen die Carposporen. Die Verteilung derselben wie auch der Verlauf der sporogenen Fäden ist aus der Figur 86, 1 ohne

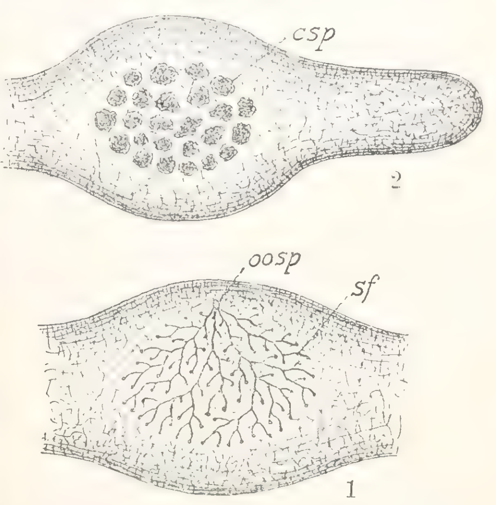


Fig. 86. Gigartina, Querschnitt des fertilen Sproßstückes. 1 Schema der Verzweigung der sporogenen Fäden (sf) in der Jugend. 2 Mit reifen Carposporen (csp).

weiteres ersichtlich. Im übrigen bietet diese Gruppe nicht soviel Interesse und ist auch nicht so gut untersucht, daß man sie hier noch weiter zu besprechen brauchte. Vielleicht darf noch betont werden, daß in diese Abteilung auch Harveyella gehört, eine parasitische farblose Floridee.

5. Rhodymeniales haben an dieser Stelle fast noch weniger Interesse als die vorige Gruppe. Carpogone und Auxiliarzellen stehen nahe beisammen, sind aber nicht immer zu typischen Procarpien vereinigt. Die Auxiliarzelle wird erst nach der Befruchtung des Carpogones gebildet. Die sporogenen Fäden bilden in Verbindung mit anderen Zellen in einem derbwandigen Cystocarpium einen eigenartigen Fruchtkern. Dieser ist gewöhnlich dem Grunde der Höhlung angeheftet.

Hierher gehört Gracilaria eine derbe Form mit reich verzweigten gerundeten Sprossen, welchen die Cystocarpien als derbe Warzen aufgesetzt sind. Hierher gehört ferner unter vielen

anderen Chylocladia wiederum eine ziemlich große Form mit reich verzweigten durch Diafragmen gegliederte Sprosse. Auffallend ist hier die Fusionierung der sporogenen Zellen, nicht bloß mit den Auxiliarzellen, sondern auch mit zahlreichen Nachbarn derselben, so daß auch hier eine Art Kuchen gebildet wird, aus dem dann die Carposporen hervorgehen.

Tetrasporen. Wir müssen nun auf die ungeschlechtliche Fortpflanzung der Florideen eingehen. Diese geschieht durch Tetrasporen. Bei Callithamnion sehen wir an dem oberen Ende der Zweige inhaltsreiche dunkle Zellen sich vorwölben, sich fast kugelig abrunden und dann durch eine Querwand abgegliedert werden, das sind die Tetrasporangien (Fig. 87, 1). Innerhalb der großen Zelle

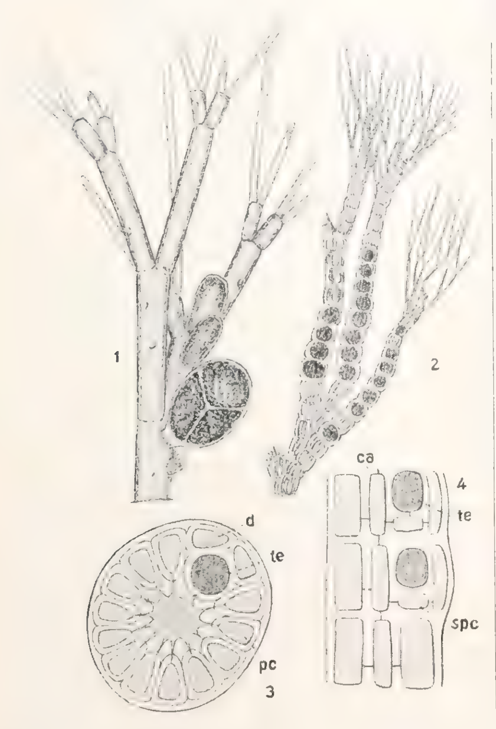


Fig. 87. Tetrasporenbildung. 1 Callithamnion corymbosum. 2 Polysiphonia, Zweige mit Tetrasporen. 3 und 4 Längs- und Querschnitt durch ein sporenbildendes Sproßstück einer Polysiphonia. ca zentrale Achse. pc Pericentrale. te Tetrasporangien. d Deckzelle. spc Tragzelle.

teilt sich der Kern sukzessive zweimal; um die vier Kerne gruppieren und sondern sich die Plasmamassen (Fig. 87, 1), und dann schlüpfen vier große membranlose Tetrasporen aus der Mutterzelle heraus. Diese sinken nach einiger Zeit im Wasser nieder, um sich mit Membran zu umgeben und zu keimen.

Bei Polysiphonia liegen die Tetrasporangien im Gewebe der Sprosse (Fig. 87, 2). Sie werden durch eigenartige Teilungen, die am besten aus der Figur 87, 3 und 4 zu ersehen sind, aus den Perizentralzellen herausgeschnitten, bleiben aber bis zu ihrer Reife durch eine Deckschicht geschützt. Diese wird abgehoben, wenn die Tetrasporen hervortreten.

Mit Ausnahme der zuerst genannten Gattungen, z. B. Dudresnaya, hat die große Mehrzahl der Florideen Tetrasporen, die sich im Prinzip alle gleich entwickeln, mag auch ihre Stellung an den Sprossen usw. in den verschiedenen Gruppen ganz verschieden sein. Bei fast allen Formen, die Tetrasporen besitzen, sind auch die Sexualorgane auf verschiedene Pflanzen verteilt, so daß wir bei ihnen dreierlei verschiedene Individuen haben, ungeschlechtliche, männliche und weibliche. Einige Wahrscheinlichkeit besteht, daß die Tetrasporen ungefähr zu gleichen Teilen bei der Keimung männliche und weibliche Individuen liefern, und daß aus den Carposporen dann gleichmäßig Tetrasporen hervorgehen. Experimentell bewiesen ist das aber nicht. Auch die Kerne geben keine volle Auskunft. Die Geschlechtspflanzen weisen die einfache Chromosomenzahl durch alle Teilungen hindurch auf. Durch den Sexualakt erhalten die Zygote, die aus ihr hervorgehenden sporogenen Fäden, wie auch die Carposporen die doppelte Chromosomenzahl. Und diese wird auch festgehalten durch die Tetrasporenexemplare hindurch bis in das Tetrasporangium hinein. In diesem findet dann wieder die Reduktion auf die einfache Zahl statt. Daraus wurde geschlossen, daß die männlichen und weiblichen Exemplare den Gametophyten darstellen, daß aber sporogene Fäden, mit den Corposporen und die Tetrasporenexemplare als Sporophyten müßten aufgefaßt werden. Diese Auffassung ist keineswegs unbestritten. Etwas zu entscheiden ist momentan um so weniger möglich, als die Kernverhältnisse der zuerst abgehandelten Gattungen, denen ungeschlechtliche Fortpflanzungsorgane fehlen, noch keineswegs genügend untersucht sind.

Mir selber scheint es auch jetzt noch besser, die Antheridien und Carpogonien tragenden Pflanzen als Gametophyten aufzufassen und die sporogenen Fäden mit den Carpogonen als den Sporophyten. Die Pflanzen mit Tetrasporen wären dann Gametophyten mit unterdrückten Sexualorganen. Bei der Beurteilung solcher Fragen kommt es eben wesentlich darauf an, ob man der Reduktion der Chromosomenzahlen eine entscheidende

Bedeutung für den Generationswechsel beimessen will.

Literatur. *a) Allgemeines.* **Fr. Oltmanns,** *Morphologie und Biologie der Algen, Jena 1904/05.* — **I. P. Lotsy,** *Vorträge über botanische Stammesgeschichte I. Algen und Pilze, Jena 1907.* — **G. Klebs,** *Die Bedingungen der Fortpflanzung bei einigen Algen und Pilzen, Jena 1896.* — **Thuret et Bornet,** *Etudes phycologiques Paris 1878.* — **Ed. Bornet,** *Notes Algologiques, Paris 1876.* — *b) Spezielles.* **Engler und Prantl,** *Natürl. Pflanzenfamilien I, 2, Leipzig 1897, Nachträge 1909 u. 1910.* — **de Toni,** *Sylloge Algarum 1889 bis 1903.* — **T. F. Kützing,** *Tabulae phycologicae, Nordhausen 1845 bis 1869.* — **L. Rabenhorst,** *Flora europaea algarum aquae dulcis et submarinae, Lipsiae 1864.* — **R. Chodat,** *Algues vertes de la Suisse, Bern 1902.* — **Hansgirg,** *Algenflora von Böhmen.* — **F. Hauck,** *Die Meeresalgen Deutschlands und Oesterreichs. Rabenhorst Kryptogamenflora II, Leipzig 1885.* — **J. Reinke,** *Atlas deutscher Meeresalgen, Kiel 1889 bis 1892.* — **Derselbe,** *Algenflora der westl. Ostsee, Ber. der Komm. zur Erforschung deutscher Meere in Kiel 1888.* — **P. Kuckuck,** *Beiträge zur Kenntnis der Meeresalgen. Wiss. Meeresuntersuchungen herausgeg. v. d. Komm. zur Unters. der deutschen Meere usw., N. F. 2 u. 3 1897 u. 1899.* — **Derselbe,** *Bemerkungen zur marinen Algenflora v. Helgoland, Ebenda 1 u. 2 1894 u. 1897.* — **Jean Chalon,** *Liste des algues marines observées . . entre l'embouchure de l'Escaut et la Corogne incl. îles anglo-normandes, Anvers 1905.* — **H. van Heurck,** *Prodrome de la flore des îles Anglo-Normandes, Jersay 1908.* — **Berthold,** *Algen des Golfs von Neapel, Mittlg. d. zool. Stat., Neapel 1882.* — **W. H. Harvey,** *Phycologia Britannica, London 1846 bis 1851.* — **K. L. Rosenvinge,** *Marine Algae of Denmark, Kgl. D. Videnskabs Selskabs Skrifter 1909, 7. R. Afd. 7.* — **F. R. Kjellman,** *Handbok in Skandinavien Hafsalgflora, Stockholm 1890 ff.* — **Derselbe,** *Algenregionen und Algenformationen im östlichen Skagerrack. K. Svenska Vet. Akad. Handl. 1878,* **5.** — **H. Kylin,** *Studien über die Algenflora der schwedischen Westküste. Akadem. Abhandl., Upsala 1907.* — **F. Börgesen,** *Marine Aigae of the Faeröes, Botany of the Faeröes* **2,** *1902.* — **Derselbe,** *The Algae, Vegetation of the Faeröese Coasts. Ebenda* **3,** *1905.* — **L. K. Rosenvinge,** *Grönlands Hafalger. Medeeeelder om Grönland 1895 ff.* — **F. R. Kjellmann,** *Algae of the arctic sea. Kgl. Sv. Vet., Akad. Handl. 1883,* **20.** — **Derselbe,** *Beringhafvets Algflora, Ebenda 1889,* **23.** — **C. Skotsberg,** *Zur Kenntnis der subantarktischen Meeresalgen. Wiss. Ergebnisse der Schwed. Südpolarexpedition.* **4** *1907.* — **Farlow,** *The marine algae of New-England 1880.* — **W. H. Harvey,** *Nereis boreali-americana.* — **F. S. Collins,** *The green Algae of North America. Tufts College Studies* **2,** *1905 bis 1909.* — **Svedelius, Nils.** *Report of the marine Algae of Ceylon. Reports from the marine biological Labor. 2, 1906.* — **K. Okamura,** *Illustrations of the marine Algae of Japan. Tokio 1900 ff.* — **Derselbe,** *Icones of japanese Algae. Tokyo 1909.* — **W. H. Harvey,** *Phycologia australica 1858 bis 63.* — *Die Abbildungen sind dem zuerst genannten Werk entnommen. Dort sind auch die Quellen für dieselben angegeben.*

F. Oltmanns.

Algonkium

siehe Praecambrium.

Aliphatische Kohlenwasserstoffe.

1. Definition und Einteilung. 2. Gesättigte Kohlenwasserstoffe oder Paraffine: a) Systematik, Konstitution und Isomerie; b) Physikalische und chemische Eigenschaften; c) Vorkommen und Verwendung (Petroleum, Vaselin, Paraffin usw.); d) Darstellung. 3. Die ungesättigten Kohlenwasserstoffe: a) Olefine: Systematik, Konstitution und Isomerie. Physikalische und chemische Eigenschaften. Darstellung, Additions- und Abspaltungsreaktionen; b) Diolefine: Verhalten und Darstellung; c) Acetylene: Verhalten und Darstellung; d) Kohlenwasserstoffe C_nH_{2n-4} usw.

1. Definition und Einteilung. Die Kohlenwasserstoffe der aliphatischen Reihe umfassen die Verbindungen von C und H, in deren Molekül man ihrem chemischen Verhalten nach eine kettenförmige Aneinanderreihung der C-Atome annimmt. Die nähere Begründung dieser Annahme erfolgt weiter unten. Sie stehen als „offene" Ketten in Gegensatz zu den „geschlossenen" oder zyklischen Kohlenwasserstoffen, den aromatischen Kohlenwasserstoffen und den Polymethylenen, bei denen angenommen wird, daß die C-Atome im Molekül eine geschlossene Kette oder einen Ring bilden. Von der aromatischen Reihe unterscheiden sie sich sehr deutlich, viel weniger von den Polymethylenen. Man pflegt die aliphatischen Kohlenwasserstoffe einzuteilen in Paraffine, Olefine und Acetylene, die sich zunächst durch den relativen Wasserstoffgehalt unterscheiden.

2. Gesättigte aliphatische Kohlenwasserstoffe oder Paraffine. 2a) *Systematik, Konstitution und Isomerie.* Die Paraffine[1]) umfassen die wasserstoffreichsten Kohlenwasserstoffe, die wir kennen und die darum auch „Grenzkohlenwasserstoffe" genannt werden. Ihre Zusammensetzung entspricht der allgemeinen Formel C_nH_{2n+2} z. B. C_3H_8, C_7H_{16} usw. Die Glieder dieser Reihe sind — mit teilweisen Lücken — bekannt bis C_{35}. Der höchste bekannte paraffine Kohlenwasserstoff hat 60 C-Atome, doch ist

[1]) Der Name Paraffine soll die mangelnde Reaktionsfähigkeit (parum affinis) zum Ausdruck bringen. Die im täglichen Leben schlechthin als Paraffin bezeichnete weiße wachsartige Masse besteht aus hochmolekularen Paraffinen.

wohl anzunehmen daß ihre Reihe, wenn Interesse dafür bestünde, sich noch bis zu bedeutend höherer C-Zahl aufbauen ließe. Die Analysenzahlen liegen bei den höheren Gliedern einander so nahe, daß sie die einzelnen nicht voneinander unterscheiden, und daher auch, ob reine Verbindungen oder Gemische vorliegen, nicht ersehen lassen. Mit immer größer werdendem n nähert sich die Zusammensetzung der der wasserstoffärmeren Kohlenwasserstoffe mit der typischen Formel C_nH_{2n} immer mehr, so zeigt $C_{35}H_{72}$ 85,36% C, 14,64% H, während alle Kohlenwasserstoffe der Formel C_nH_{2n} 85,71% und 14,29% H enthalten. An Stelle der Analyse zur Charakterisierung benützbar sind Bestimmung des Molekulargewichts,[1]) Feststellung physikalischer Konstanten (Siedepunkt, Schmelzpunkt), schließlich Auf- und Abbaumethoden. Die Namen der paraffinen Kohlenwasserstoffe sind Methan CH_4, Aethan C_2H_6, Propan C_3H_8, Butan C_4H_{10}, Pentan C_5H_{12}, Hexan, Heptan usw. (Bildung der Namen aus dem griechischen Zahlwort durch Anhängung der Silbe -an). Die ersten 3 existieren nur in Einzahl, Butan in 2, Pentan [2]) in 3, Hexan in 5 isomeren Formen und mit wachsendem C-Gehalt steigt die Zahl der Isomeren außerordentlich schnell; eine Tatsache die in der verschiedenen Anordnung oder Bindung der C-Atome untereinander, der Gestalt des „C-Gerippes" oder „Skeletts" ihre einleuchtende Erklärung findet. Die Formel des einfachsten Kohlenwasserstoffes, des Methans CH_4 läßt keine Mehrdeutungen zu. Die aus ihr erschlossene Vierwertigkeit des C-Atoms wird als konstant in allen organischen Verbindungen angenommen. (Nur in wenigen Fällen (CO und HCN) pflegt man nach herrschender Ansicht zweiwertigen, ganz vereinzelt auch dreiwertigen Kohlenstoff anzunehmen). Läßt man auf Jodmethyl, eine der Formel CH_3J entsprechende Verbindung, die also als ein Methan aufgefaßt werden kann, dessen einer Wasserstoff durch das ebenfalls einwertige Jod ersetzt ist, Natrium einwirken, so bildet sich Jodnatrium, während von den entjodeten Resten sich 2 zu einem höheren Kohlenwasserstoff $2CH_3$ oder C_2H_6 (Dimethyl oder Aethan) zusammenfügen. Diesem Kohlenwasserstoff, der sich andererseits aus Jodäthyl C_2H_5J auf hier nicht zu erörternde Weise bei Ersatz von Jod durch H darstellen läßt, wird demgemäß die Formel

$$\begin{array}{l} H \quad\quad H \\ H-C-C-H \\ H\diagup \quad \diagdown H \end{array}$$

zuerkannt, denn der Zusammenhang des Moleküls muß durch die C-Atome bedingt sein, da H als einwertiges Element ihn nicht bewirken kann. Die C-Atome werden daher hier und in allen höheren, auf analoge Weise herstellbaren Kohlenwasserstoffen gleichsam kettenförmig verbunden angenommen. Der aus Jodäthyl C_2H_5J analog mit Natrium gewinnbare Kohlenwasserstoff muß folgerichtig

$$C_2H_5-C_2H_5 \text{ oder } \begin{array}{c} \;\;H\;\;\;H\;\;\;H\;\;\;H \\ H-C-C-C-C-H \\ \;\;H\;\;\;H\;\;\;H\;\;\;H \end{array}$$

formuliert werden; aus JCH_3 und JC_2H_5 dagegen[1])

$$\text{muß mit Natrium entstehen } \begin{array}{c} \;\;H\;\;\;H\;\;\;H \\ H-C-C-C-H \\ \;\;H\;\;\;H\;\;\;H \end{array}$$

oder C_3H_8 Propan. Auf diese Weise läßt sich eine „homologe Reihe", die der sogenannten normalen Paraffine aufbauen als Gebilde bestehend aus einer „graden" d. h. unverzweigten Kette aus lauter CH_2-Gliedern (mit „sekundären" C-Atomen), mit je einem CH_3 mit „primärem" C-Atom am Anfang und Ende, entsprechend der Formel $CH_3-(CH_2)_n-CH_3$ oder C_nH_{2n+2}. Der Ausdruck „gerade" Kette ist dabei nicht wörtlich zu nehmen. Er soll nur den Gegensatz zur Verzweigung betonen. Es ist sehr unwahrscheinlich, daß die Aneinanderreihung der C-Atome in der Tat etwa im Sinne einer geraden Linie stattfindet. Vielmehr neigt man der Annahme zu, daß die Kette die Form einer Spirale hat. Dafür spricht z. B. die Tatsache, daß die Beziehungen zwischen den C-Atomen der Kette, bei intramolekularen Abspaltungen z. B., nicht ihrer Entfernung bei Annahme einer völlig geraden Kette entsprechen, sondern zwischen scheinbar entfernteren engere Beziehungen obwalten, als zwischen solchen, die einander näher sind.[2]) Aus jedem Paraffin kann das nächst höhere entstanden gedacht werden durch Ersatz eines H-Atoms durch die Methylgruppe CH_3. Daraus ergibt sich die geometrische und durch die Tatsachen bestätigte Folgerung, daß der niederste gesättigte Kohlenwasserstoff, der zweierlei isomere Derivate — also auch 2 nächsthöhere Kohlenwasserstoffe — liefern kann, das Propan ist, weil es 2 verschiedene Gruppen, nämlich $2CH_3$ und $1CH_2$ enthält. Den bekannten Propyl-Jodiden werden z. B. die Formeln zukommen müssen $CH_2J-CH_2-CH_3$ und $CH_3-CHJ-CH_3$, wobei Formel 1 dem aus normalem Propylalkohol, Formel 2 dem aus sogenanntem

[1]) D. h. zur Unterscheidung zweier Paraffine, nicht etwa aber der von Paraffin und Olefin gleicher C-Zahl, deren Molekulargewichte einander viel zu nahe liegen.

[2]) Ueber ein weiteres viertes Pentan unbekannter Struktur vgl. Beilst. Erg. I, 12.

[1]) Als Nebenprodukte treten erklärlicherweise bei dieser Reaktion die Kohlenwasserstoffe C_2H_6 und C_4H_{10} auf.

[2]) Nach Michael (B. 39, 2139) drückt folgende Zahlenreihe jene Beziehungen aus 1—2—3—5—6—4—7—(9—10—11)—8, d. h. es steht z. B. das fünfte und sechste C-Atom dem ersten näher als das vierte.

iso-Propylalkohol darstellbaren zukommt. Die Konstitution der beiden Alkohole hinwiederum ist durch die Art ihrer Oxydationsprodukte (Aldehyd resp. Keton vgl. S. 199) festgelegt. Einwirkung von Natrium auf das „sekundäre“ Jodid (Formel 2) muß offenbar erzeugen eine Verbindung

$$\begin{array}{c} CH_3-CH-CH_3 \\ | \\ CH_3\quad CH\quad CH_3 \end{array}$$

ein Hexan, Di-iso-propyl genannt; Natrium mit einem Gemisch von Methyl- und iso-Propyljodid dagegen muß ergeben ein Butan

$$\begin{array}{c} CH_3-CH-CH_3 \\ \\ CH_3 \end{array}$$

iso-Butan genannt, also ein Isomeres des aus C_2H_5J mit Natrium gewinnbaren normalen Butans $CH_3-CH_2-CH_2-CH_3$. In der Tat zeigt das Experiment in allen diesen Fällen das Entstehen von Kohlenwasserstoffen, deren Zusammensetzung und Verhalten die gemachten Annahmen bestätigt. Auf analoge Weise kann auch

$$\begin{array}{c} CH_3-CH-CH_2-CH_3 \\ | \\ CH_3 \end{array}$$

erhalten werden, in dem also d r e i verschiedene C-Atome vorhanden sind, drei primäre, und und je ein sekundäres und tertiäres. Dieser Kohlenwasserstoff vermag aber nicht nur dreierlei Derivate zu liefern je nachdem Wasserstoff in CH_3, in CH_2 oder in CH ersetzt wird, sondern es ergibt sich eine vierte Möglichkeit aus der Ueberlegung, daß nur zwei der vorhandenen Methylgruppen stellungsäquivalent (symmetrisch) sind, die dritte aber von beiden verschieden ist. Im Jodid des vorerwähnten iso-Butans

$$\begin{array}{l} CH_3\diagdown \\ \qquad\quad CJ-CH_3 \\ CH_3\diagup \end{array}$$

kann man endlich Jod wieder gegen Methyl austauschen und gelangt so zu der letzten geometrisch denkbaren Konfiguration mit quartärem oder quaternärem C-Atom,

$$\begin{array}{ccc} CH_3 & & CH_3 \\ & C & \\ CH_3 & & CH_3 \end{array}$$

einem als Tetramethylmethan bezeichneten Pentan. Ein besonderer Isomeriefall tritt ein bei den tertiären und quartären Kohlenwasserstoffen, die an Kohlenstoff gebunden vier verschiedene Bestandteile enthalten. Um ein solches „asymmetrisches“ C-Atom herum können sich die Radikale i m R a u m in zwei Weisen gruppieren, die sich wie linke und rechte Hand zueinander verhalten (vgl. näheres in den Artikeln „Isomerie“ und „Drehung der Polarisationsebene“).

Alle Kohlenwasserstoffe mit verzweigter Kette, die eine CH-Gruppe enthalten, werden durch Vorstellung der Silbe iso- (abgekürzt i-) gekennzeichnet, während die mit kreuzweis verzweigter Kette, wie das Tetramethylmethan, mit einem allerdings nicht sehr gebräuchlichen Namen als Neoparaffine bezeichnet werden.

Ein einfacher qualitativer Nachweis für Vorhandensein der verschiedenen Gruppen eines Kohlenwasserstoffes existiert nicht, besonders nicht für das von CH_3 oder CH_2. Er kann nur so geführt werden, daß jede CH_3-Gruppe eines Kohlenwasserstoffes (ohne Aenderung seiner C-Atomzahl) über die Halogenderivate (vgl. S. 199) in die Aldehydgruppe, jede CH_2-Gruppe in die Ketongruppe, und nur ein CH enthaltender Kohlenwasserstoff in einen tertiären Alkohol verwandelt werden kann, sodaß also drei leicht identifizierbare Derivate entstehen, während quartär gebundenes C bei der Festigkeit der C-C-Bindung und bei dem Fehlen von Komplementärvalenzen des Kohlenstoffs (über vier hinaus) naturgemäß keine Reaktionen zeigt. Die Erschließung der unbekannten Konstitution eines höheren Paraffins kann meist erst mit Sicherheit aus seinem Aufbau geschehen. Legt man die gewonnenen Vorstellungen von der „Verzweigung der C-Ketten“ als heuristisches Prinzip zugrunde, so kann man die Zahl der überhaupt möglichen Isomeren berechnen, als die der möglichen geometrischen Gebilde. Dazu kommt bei manchen Tri- und Tetraalkylmethanen jene weitere mögliche Isomerie, die nur auf Grund stereometrischer Vorstellungen ihre Erklärung findet (vgl. oben). Die so berechnete Zahl deckt sich bei den niederen Gliedern (bis C_6) mit der wirklich bekannten; andererseits übersteigt die Zahl bekannter Kohlenwasserstoffe nicht die Zahl der nach den gewonnenen Vorstellungen denkbaren Isomeren; für die höheren steht die Zahl dargestellter Kohlenwasserstoffe beträchtlich hinter der der berechneten zurück. Von neun möglichen Heptanen z. B. sind bislang nur fünf bekannt. Doch liegt der Grund dafür ohne Zweifel nur darin, daß ihre Darstellung zwar keine besonderen Schwierigkeiten, aber zur Zeit keinerlei Interesse bietet. Von den meisten höheren Gliedern ist nur ein Isomeres bekannt, und zwar in der Regel das mit normaler Kette. Die Zahl der verzweigten ist demgegenüber unendlich viel größer, wie einfache Ueberlegung lehrt. Es ergibt sich daraus die Verkehrtheit des Versuchs die typischen Reaktionen paraffiner Kohlenwasserstoffe lediglich aus der geringen Zahl derer mit normaler Kette ableiten zu wollen, wie man wohl früher getan hat, während sich später das Verhalten der Isoparaffine als von dem der normalen wesentlich verschieden herausgestellt hat (vgl. S. 180). Die Gesamtzahl möglicher Isomerer berechnet sich für C_9

auf 20, für C_{12} auf 355, für C_{14} auf 1855 und höher hinauf steigt die Zahl ganz gewaltig.

2b) Physikalische und chemische Eigenschaften. Dem Fortschreiten von den niederen zu den höheren Gliedern parallel geht eine fast kontinuierliche Aenderung der physikalischen Eigenschaften — die chemischen unterliegen dabei überhaupt so gut wie keiner Aenderung — und zwar derart, daß die einer Differenz um ein C-Atom entsprechende Aenderung um so kleiner wird, je höher man in der Reihe aufsteigt. Dicht bei oder neben einander liegende Glieder sind nur bei den niedersten stärker unterschieden, in den höheren Gliedern sind sie überaus ähnlich. Ihre physikalischen Konstanten rücken einander immer näher. Bei gewöhnlicher Temperatur und Druck sind flüssig die Paraffine von C_5 (Sdp der drei Isomeren 37°, 30°, 9,5°) bis C_{15} (Sdp des normalen Kohlenwasserstoffs 270°, Fp. 10°), die niedrigeren Glieder sind Gase, die höheren feste, kristallisierbare Substanzen (Fp. für C_{16} 18°; C_{15} 22,5°; C_{18} 28°...C_{60} 102°).

Die normalen Kohlenwasserstoffe haben regelmäßig den höchsten Siedepunkt (Sdp); je verzweigter die Kette, je größer die Zahl ihrer Methylgruppen, um so niedriger wird derselbe. Jedoch liegt der höchste Sdp eines Kohlenwasserstoffes C_n immer noch tiefer als der des niedrigst siedenden Isomeren C_{n+1}. Legt man die längste mögliche Kette zugrunde und betrachtet die anderen als Seitenketten, so erniedrigt nach Menschutkin die Seitenkette den Siedepunkt um so mehr, je näher sie dem Ende der Kette steht. Der niedrigste Sdp tritt auf, wenn z. B. zwei Seitenketten an die beiden vorletzten C-Atome gebunden sind. Beispiele: n-Heptan 98,5°; i-Heptan 90,2°; n-Oktan 124,7°; Methylheptan 116°; 117,6°; 118° je nach Stellung der CH_3-Gruppe an C_{II}[1]), C_{III} oder C_{IV}; Dimethylhexan je nach Stellung der CH_3-Gruppe, benachbart an C_{II} und C_{III} 113,9°; an C_{III} und C_{IV} 116,5°; nicht benachbart an C_{II} und C_{IV} 110°; an C_{II} und C_V 108,3°. Die höheren Glieder sieden nur unter vermindertem Druck unzersetzt. Die Neigung zur Zersetzung, deren Produkte später besprochen werden, wächst mit der C-Atomzahl.

Ebenfalls eine Funktion der C-Atomzahl ist die Löslichkeit, z. B. die in Alkohol, der die ersten Glieder leicht, die mittleren schwieriger, die höheren gar nicht mehr aufnimmt. Unlöslichkeit in Wasser ist allen gemein, den ersten 30 ungefähr außerdem die Löslichkeit in Aether. C_{35} löst sich nur noch schwer in kochendem Aether. Die spezifischen Gewichte der flüssigen oder verflüssigten Kohlenwasserstoffe steigen ebenfalls anfangs schnell (C_2 0,446; C_3 0,536; C_4 0,600 bei 0°), bei den höheren langsam (C_{23} 0,7785; C_{24} 0,7786 beim S. P. bestimmt) und nähern sich asymptotisch einem bei etwa 0,785 liegenden Maximum. Bei diesen letzten sind daher die Molekularvolumina den Molekulargewichten fast proportional. Die spezifische Wärme zeigt ein Abnehmen mit steigendem Molekulargewicht (C. 02 II 682), umgekehrt zeigt zugleich damit die Verdampfungswärme ein rapides Fallen. Bei Einwirkung von Radiumstrahlen und Anwendung hochgespannter Ströme (3000 Volt) ist angeblich (C. 09 II 1112 und 1521) eine Leitfähigkeit hochmolekularer Paraffine nachgewiesen worden, die auf Ionisation zurückgeführt wird. Bei festen soll dieselbe mehrere Stunden bestehen bleiben, bei flüssigen verschwindet sie nach einigen Minuten. Vielen eigentümlich ist der sogenannte Kohlenwasserstoffgeruch[1]) — reines Methan riecht nach Moissan angenehm lauchartig, nach anderer Angabe ist es geruchlos. Bei den höheren Kohlenwasserstoffen tritt der Geruch erst bei erhöhter Temperatur, z. B. nach dem Schmelzen auf. Die Paraffine sind wie fast alle Kohlenwasserstoffe farblos und geschmacklos. Physiologisch sind sie, wenn auch nicht indifferent, so doch nicht eigentlich giftig, am ehesten noch die Dämpfe der niederen Glieder als Atemgifte.

Ihren chemischen Eigenschaften nach zeigen die Paraffine großen Mangel an Reaktionsfähigkeit, und sind beständig allen möglichen, chemisch noch so aktiven Stoffen gegenüber, wie Alkalien, Alkalimetallen, konzentrierten Säuren usw. Sie sind darum auch zur Ausführung von Synthesen wenig geeignetes Rohmaterial. Dazu kommt die beträchtliche Schwierigkeit, wohl definierte Einzelkohlenwasserstoffe aus dem komplizierten Gemisch, in dem sie uns die Natur im Petroleum, allerdings in überreichlicher Menge bietet, zu isolieren. Umgekehrt sind die Kohlenwasserstoffe aus ihren Substitutions- und Oxydationsprodukten relativ leicht und rein erhältlich. Zur Darstellung der Derivate der Paraffinreihe dienen daher vor allem die leicht zugänglichen und stark reaktiven Alkohole.

Von Reaktionen paraffiner Kohlenwasserstoffe sind nur zu erwähnen: 1. Veränderungen bei hoher Temperatur, 2. Veränderungen durch freie Halogene, 3. Veränderungen durch Salpetersäure und konzentrierte Schwefelsäure.

1. Die Paraffine sind wie alle organischen Substanzen unbeständig gegen hohe Temperaturen.

a) Sie sind brennbar. Die Reaktion,

[1]) C_{II}, C_{III} usw. bedeutet zweites, drittes usw. C-Atom in der Kette.

[1]) C_5—C_7 nach V. Meyer-Jakobson I 175 von schwachem angenehm ätherischem Geruch. Vgl. auch die Anmerkung S. 182.

deren Endprodukte bekanntlich CO_2 und H_2O[1]) sind, führt zweifellos über sehr mannigfache Zwischenprodukte, vor allem über die nach b) entstehenden ungesättigten Kohlenwasserstoffe, die dann weiter Sauerstoff in irgendeiner Form anlagern, worauf die Anlagerungsprodukte weiter zerfallen. Dabei wird angenommen und ist zum Teil nachgewiesen Bildung von Glykolen, Aldehyden, Peroxyden u. a. Der Sauerstoff lagert sich entweder in Form von, vorübergehend unter Mitwirkung der Feuchtigkeit gebildetem, H_2O_2 oder vielleicht auch von Ozon an. Die Verbrennung stellt damit gewissermaßen eine Umkehrung des in der Pflanze vor sich gehenden Prozesses dar, bei dem die Luftkohlensäure höchstwahrscheinlich über die Aldehydstufe durch Reduktionen und Kondensationen zu Kohlehydraten (Zucker, Stärke, Zellulose) umgewandelt wird und weiterhin zu sekundären Produkten, unter denen auch Kohlenwasserstoffe auftreten können, vor allem die sogenannten Terpene (vgl. S. 193).

b) Die Wirkung hoher Temperatur auf Kohlenwasserstoffe äußert sich, auch bei Abwesenheit oxydierenden Sauerstoffs, in einem Zerfall gesättigter Kohlenwasserstoffe mit höherem, in solche mit niederem Siedepunkt und Kohlenstoffgehalt, bei sehr hohen Temperaturen auch von Wasserstoff. So zerfällt Aethan im glühenden Rohr in Aethylen und Wasserstoff; aromatisch substituierte Aethane noch leichter z. B. Dibenzyl $C_6H_5CH_2CH_2C_6H_5$ in Stilben $C_6H_5CH:CHC_6H_5$ und Wasserstoff; Hexan bei 1200° aber direkt in Kohlenstoff und Wasserstoff (C. 96,377). Im übrigen verläuft jener Zerfall bei allen Paraffinen ziemlich im gleichen Sinne, nämlich unter Absprengung kleiner gesättigter Teilstücke, vornehmlich Methan. Dieses bildet sich bei allen möglichen pyrogenen Zersetzungen; auch aus Aethylen, aber nicht umgekehrt. Es entsteht auf thermischem Wege aus Paraffinen, Aethylenen und Acetylenen. Katalysatoren vermögen die thermische Zersetzung in ihrer Richtung und Geschwindigkeit mannigfach zu beeinflussen. So geht bei Gegenwart von Mg oder Al die Zersetzung von CH_4, C_2H_6, C_2H_4 (Aethylen) und C_2H_2 (Acetylen) direkt bis zu Kohlenstoff und Wasserstoff (B. 40, 2871).

Bei Absprengung eines kleineren Paraffinmoleküls von einem Paraffin muß der überbleibende Rest wasserstoffärmer, „ungesättigt" sein entsprechend der Gleichung

$$C_{m+n}H_{2m+2n+2} \rightarrow C_mH_{2m} + C_nH_{2n+2}.$$

Bei hochmolekularen Kohlenwasserstoffen genügt dazu die Erhitzung unter gewöhnlichem Druck, sie sieden nicht unzersetzt. Ueberhitzung der Dämpfe oder Anwendung erhöhten Druckes begünstigt indes die Zersplitterung in hohem Maße (Cracking-Prozeß vgl. S. 191). In sekundärer Reaktion können sich die entstandenen ungesättigten „Olefine" in mannigfacher Weise weiter umbilden nach Reaktionen, die in dem sie behandelnden Kapitel zu erwähnen sein werden. Der analoge Zerfall der Paraffine tritt ein bei ihren Derivaten z. B. den Sauerstoff- und Halogen-Substitutionsprodukten, nur entsprechend leichter.

2. Halogen in freier Form wirkt auf Paraffine schon bei gewöhnlicher Temperatur substituierend ein, Chlor am leichtesten, bei den niederen Gliedern im Sonnenlicht mit explosiver Heftigkeit. Halogen tritt dabei mit abgespaltenem Wasserstoff als Halogenwasserstoff aus, während der übrig bleibende organische Rest Halogen an Wasserstoffs Stelle bindet

$$C_nH_{2n+2} + Cl_2 \rightarrow C_nH_{2n+1}Cl + HCl.$$

Bei den Jodderivaten ist die Reaktion so leicht umkehrbar, daß Substitutionen mit freiem Jod nur unter Zusatz HJ-bindender Mittel (HgO, HJO_3 u. a.) ausführbar sind, während der umgekehrte Verlauf, Reduktion eines Jodides zum Kohlenwasserstoff mit Jodwasserstoff durch jodbindende Mittel wie roten Phosphor begünstigt wird (vgl. S. 183). Die Substitution durch Halogen ist positiv katalytischen Einflüssen sehr zugänglich (Halogenüberträger z. B. Eisen, Jod, $SbCl_5$), ferner wird sie, entsprechend der beschleunigten Bildung von HCl aus den Elementen im Sonnenlicht, durch dieses stark gefördert. Praktische Bedeutung hat die Reaktion wenig, da sie bei der Monosubstituierung nicht stehen bleibt, vielmehr schlecht trennbare Gemische höher halogenisierter Produkte entstehen läßt. Um so größer ist ihre theoretische Bedeutung als, scheinbar wenigstens, einfachste organische Reaktion. Es erhebt sich die Frage, welchen Platz im Molekül das oder die eintretenden Halogenatome einnehmen und wodurch die Reaktion eigentlich zustande kommt. Bei normalen Ketten wird zuerst vorwiegend ein Endglied CH_3, bei höheren Kohlenwasserstoffen gleichzeitig in anderen Molekülen das vorletzte C-Atom chloriert, bei tertiären dagegen die CH-Gruppe. Die Art der weiteren Einwirkung des Halogens unterliegt keiner einfachen Gesetzmäßigkeit. Die Bromierung verläuft nach anderen einfacheren Regeln, als die Chlorierung, und zwar so, daß die entstehenden Polybromverbindungen lauter monobromierte C-Atome enthalten. Die Chlorierung verläuft dagegen verschieden je nach den Bedingungen (Temperatur, Anwesenheit von Katalysatoren usw.). Die ersten beiden eintretenden Cl-Atome verteilen sich auf zwei C-Atome an einem Ende der Kette, die ent-

[1]) Dieselben Produkte entstehen durch Einwirkung kräftiger Oxydationsmittel wie H_2CrO_4, $MnO_2 + H_2SO_4$ usw.

stehenden höherwertigen Derivate dagegen enthalten die Cl-Atome bald gehäuft an einem Kohlenstoff, bald an verschiedenen. Den Reaktionsverlauf kann man sich bei Temperaturen, wo eine Dissoziation der Paraffine statthat, vorstellen entsprechend den Gleichungen

$$RCH_2-CH_3 \rightarrow RCH{=}CH_2 + H_2$$
$$H_2 + Cl_2 \rightarrow 2HCl.$$

Bei der Umbildung des entstandenen Olefins würde dann konkurrieren die Einwirkung von Halogenwasserstoff mit der des freien Halogens, beide unter Addition, so daß nebeneinander entstehen müßten $RCH_2 - CH_2Cl$, $RCHCl - CH_3$ und $RCHCl - CH_2Cl$. Eine Addition im Sinne der zweiten Formel findet, wie einwandfrei nachgewiesen ist, bei der Halogensubstitution statt, wenn auch in geringem Betrage, wie dies bei der Halogenwasserstoffaddition an Olefine allgemein die Regel ist (vgl. S 188); auch die von anderer Seite bezweifelte Bildung symmetrisch disubstituierter Halogenderivate ist durch Victor Meyer sichergestellt worden.

Durchgreifende Chlorierung führt schließlich zur Zertrümmerung des Moleküls und teilweisem Wiederaufbau in anderem Sinne. Wenigstens läßt sich das Auftreten von C_6Cl_6 Perchlorbenzol neben CCl_4 Perchlormethan und geringen Mengen C_2Cl_6 Perchloräthan und C_4Cl_6 Perchlormesol die bei allen erschöpfenden Chlorierungen, nicht nur der Kohlenwasserstoffe, sondern auch ihrer Derivate auftreten, wohl nur in dem Sinne deuten, daß unter Abspaltung von CCl_4 chlorsubstituierte Aethylene und auch Acetylene entstehen, welch letztere sich in bekannter Weise zum Benzolderivat kondensieren können (vgl. S. 194).

Krafft setzt die Einwirkung von Chlor als Verbrennungsreaktion[1]) der des Sauerstoffs an die Seite (Endprodukte CCl_4 und HCl; CO_2 und H_2O), wobei „der spaltenden Tendenz durch Cl andere Reaktionen im Wege stehen, z. B. die der Kondensation des C-Kerns zu Perchlorbenzol". Die C-Halogenverbindungen zeigen schon bei mäßig langer Kette Neigung zur Zersplitterung, eine Eigenschaft, die den C-H-Ketten auch, aber in viel geringerem Grade zukommt.

3. Rauchende Schwefelsäure führt mittlere und höhere Paraffine in Sulfosäuren RSO_3H über und löst die niederen. Chlorsulfonsäure, auf normale Kohlenwasserstoffe in der Kälte kaum einwirkend, reagiert schnell mit den Isoparaffinen z. B. dem im russischen Erdöl enthaltenen Diisopropyl.

Einwirkung verdünnter Salpetersäure unter Druck (im Einschlußrohr) „nitriert" die Paraffine. In den entstehenden „Nitroverbindungen" ist Wasserstoff durch die Nitrogruppe NO_2 ersetzt. Diese von Konowalow entdeckte und hauptsächlich von russischen Chemikern studierte Reaktion beseitigt einen der früher für die Unterscheidung aliphatischer und aromatischer Reihe als typisch angesehenen, prinzipiellen Unterschiede. Die Angaben der Literatur über die verschieden leichte Angreifbarkeit der Paraffine durch Salpetersäure weichen etwas voneinander ab, lassen aber erkennen, daß die Reaktion sehr abhängig ist von den Bedingungen (Temperatur, Druck, Zeit) und von der Art des Paraffins. Mit der C-Atomzahl steigt die Leichtigkeit der Einwirkung. Es wurden z. B. nitriert erhalten aus Hexan 10%, aus Heptan 40%, aus Nonan 70%. Alle Isoparaffine reagieren ferner mit großer Leichtigkeit, so daß z. B. oft schon durch einfaches Lösen in konzentrierter Salpetersäure und Verdünnen mit Wasser die Nitroverbindung erhältlich ist (also genau wie beim Nitrieren aromatischer Kohlenwasserstoffe) und daß die Heftigkeit der Reaktion oft durch Kühlung gemildert werden muß, während bei den normalen Kohlenwasserstoffen tagelanges Erhitzen mit verdünnter Säure notwendig ist. Die Endprodukte der Reaktion sind bald primäre (Gruppe $-CH_2NO_2$), bald sekundäre (Gruppe $=CHNO_2$), bald tertiäre Nitroverbindungen (Gruppe $\equiv CNO_2$), bald ein-, bald mehrwertige, d. h. mehrere Nitrogruppen gleichzeitig enthaltende Produkte. Infolge nebenher verlaufender Oxydation pflegen sich Säuren zu bilden wie CO_2, Essigsäure, Bernsteinsäure. Nach Nametkin (C. 08 II 1, 537) kann man die gleichen Produkte erhalten durch Arbeiten mit Säuren ganz verschiedener Konzentration, wenn man nur Druck und Temperatur entsprechend wählt. Durch diese wird der Prozeß nur hinsichtlich der Geschwindigkeit beeinflußt. Außerdem muß der gleichzeitig einhergehenden Oxydationswirkung der Säure durch Vermeidung zu starker Ueberschüsse vorgebeugt werden. Sehr bemerkenswert erscheint, daß, während normale Paraffine gegen $KMnO_4$ recht beständig sind, die tertiäre CH-Gruppe, ähnlich wie bei ungesättigten Verbindungen, dadurch angegriffen werden kann, wie am Methyldiäthylmethan nachgewiesen worden ist (B. 34, 2865). Demgegenüber hebt Willstätter hervor, daß Phytan $C_{20}H_{42}$, ein von ihm aus Chlorophyll gewonnener Kohlenwasserstoff, der nach seiner Formulierung gleich 9 tertiäre Gruppen enthält:

$$CH_3\left(-\underset{\displaystyle CH_3}{\overset{|}{CH}}-\right)_9 CH_3$$

äußerst langsam auf $KMnO_4$ einwirke. Vgl. auch Lellmann (Organische Synthese): „durch Oxydation geht die CH-Gruppe in

[1]) Auch Sauerstoffverbindungen (Bienenwachs) liefern bei Chlorierung dieselben Endprodukte.

COH über. Diese Reaktion ist bei allen Methenylgruppen fetter Substanzen leicht ausführbar ... bei Substanzen der Fettreihe verwendet man $KMnO_4$ in alkalischer Lösung" (vgl. Abschnitt 3a „Olefine").

Nach dem Grade ihrer Reaktionsfähigkeit stehen sich danach gegenüber 1. normale und Neoparaffine. 2. Isoparaffine, welch letztere die Mehrzahl aller denkbaren paraffinen Kohlenwasserstoffe umfassen. Warum ein nur in Einzahl am Kohlenstoff haftendes H-Atom größere Reaktivität zeigt, als wenn ihrer 2 oder 3 nebeneinander stehen, ist nicht bekannt. Die Reaktionsfähigkeit des tertiären C-Atoms ist übrigens bei allen Derivaten[1]) ebenso gesteigert den Isomeren gegenüber. Man vergleiche z. B. die erleichterte Addition und Abspaltung von Halogenwasserstoff und von Wasser bei den tertiären Derivaten (den primären und sekundären gegenüber) und zwar intramolekular sowohl, wie in Reaktion mit Substanzen, die reaktiven Wasserstoff enthalten (vgl. Abschnitt 3a „Olefine").

2c) Vorkommen und Verwendung. Paraffine finden sich verbreitet und, zum Teil in großer Menge, in der Natur fertig gebildet. Am häufigsten Methan, das durch gärende Zersetzung bei Luftabschluß aus Cellulose und überhaupt beim — nicht oxydativen — Abbau organischen Materials entstehen kann. Es bildet sich daher in stehenden Gewässern und Sümpfen („Sumpfgas"), findet sich in der Luft der Kohlenbergwerke (Grubengas, schlagende Wetter) und tritt als Bestandteil gasführender Quellen auf. Physiologisch bemerkenswert ist seine Bildung in den Darmgasen der Pflanzenfresser. Die wichtigste Quelle für Paraffine ist das Petroleum oder Erdöl; das aus Pennsylvania und Kanada in Nordamerika stammende besteht zum weitaus größten Teil aus paraffinen Kohlenwasserstoffen, von den niedersten — Methan enthält es gelöst — bis zu den höchsten, darunter die meisten mit normaler, einige wenige mit verzweigter Kette. Isoliert sind daraus C_4 bis C_{19} und einige höhersiedende bis C_{28}. Olefine enthält es nur sehr wenig, ebenso Naphtene und aromatische Kohlenwasserstoffe. Als Verunreinigung enthält Petroleum immer geringe Mengen O-, N- und S-haltiger Substanzen, das von Pennsylvania z. B. bis 3%. Alle Rohöle absorbieren aus der Luft Sauerstoff, wobei harzige, saure, Metall angreifende Produkte entstehen. Auch „Paraffin" (siehe weiter unten) verhält sich in der Hitze ähnlich, es nimmt dabei braune Farbe an. Die Reindarstellung der einzelnen Kohlenwasserstoffe aus Petroleum ist schwierig, sie geschieht durch immer und immer wiederholte Fraktionierung. Es verdient Interesse, daß eine solche Fraktionierung bis zu gewissem Grade merkwürdigerweise auch erreichbar ist auf dem Wege der Filtration durch manche Sorten Tone, z. B. sogenannte Fullererde. In ähnlicher Weise hält Filtration durch Erdschichten die riechenden Bestandteile des Leuchtgases zurück. Eine rohe Fraktionierung liefert die technisch wichtigen Produkte Petroläther,[1]) Gasolin (C_5 und C_6), Benzin (C_6 und C_7), Ligroin (C_7 und C_8), Brennpetroleum (von 150 bis 300° siedende Kohlenwasserstoffe; 55 bis 75% amerikanischen Erdöls), paraffinhaltige Schmieröle und schließlich die Vaseline, jene bekannte gelbe, oder nach dem Bleichen weiße salbige Masse. In derselben ist ein buntes Gemisch teils fester, teils öliger, zum Teil auch ungesättigter Kohlenwasserstoffe, oder von Polymerisationsprodukten derselben anzunehmen. Nach Abdestillieren des Leuchtöls destilliert man zur Gewinnung der Schmieröle mit Wasserdampf. Als Rückstand bleiben sehr wasserstoffarme Verbindungen und Coke. Die letzten leicht erstarrenden gelb oder grünbraun gefärbten schweren, zähen Destillate bilden das „Erdölharz". Die ersten Rohdestillate werden raffiniert durch saure oder auch alkalische Waschungen und Behandeln mit Entfärbungs- und Bleichmitteln (Sonnenlicht). Die Gewinnung des „Paraffins" geschieht durch Abkühlen und Abpressen. Ueber mutmaßliche Entstehung des Petroleums wird an anderer Stelle berichtet. Auch die anderen Erdölsorten enthalten Grenzkohlenwasserstoffe, aber wesentlich weniger als das amerikanische Oel. Das galizische enthält beträchtliche Mengen hochsiedender Paraffine neben aromatischen Kohlenwasserstoffen, das russische hauptsächlich Naphtene, d. h. den Olefinen isomere zyklische Kohlenwasserstoffe (vgl. S. 184). Englers Untersuchungen haben es wahrscheinlich gemacht, daß die scheinbar große Verschiedenheit der Petrolsorten[2]) sich dadurch erklärt, daß der Petrolbildungsprozeß aus tierisch-pflanzlichen Resten an den verschiedenen Fundorten verschieden weit fortgeschritten ist, und daß das meiste Erdöl „noch im Ausgleich begriffen" ist. Andererseits ist wohl das erdölbildende Roh-

---

[1]) Vgl. auch das Verhalten z. B. der Bromide. S. 199.

[1]) Als Rhigolen oder Zymogen findet man bisweilen ein Produkt im Handel, das noch flüchtiger ist als Petroläther.

[2]) Die Verschiedenheiten der Petrolsorten — auch die von Rumänien, Elsaß, Hannover, Texas, Kalifornien, Japan, Sundainseln seien noch genannt — sind so groß, daß keine 2 Oele auch nur ähnlich zusammengesetzt sind, selbst wenn ihre Ursprungorte nahe beieinander liegen. Fast alle Oele zeigen optische Rechtsdrehung.

material, ebenso wie die Bildungsbedingungen, als sehr verschieden anzunehmen. In Südosteuropa findet sich ein Ozokerit genanntes Erdwachs, das ebenfalls aus hochmolekularen Paraffinen besteht. Nach künstlicher Bleichung führt es den Handelsnamen Ceresin. Sein Molekulargewicht ist viel höher als das des gewöhnlichen, aus Braunkohlen stammenden „Paraffins". Das sogenannte weiße Vaselin (Unguentum Paraffini) ist ein Ozokeritparaffin, gelöst in Paraffinöl (Paraffinum liquidum), einer Petroleumfraktion. Weitere Quellen, aus denen paraffine Kohlenwasserstoffe erst durch mehr oder weniger komplizierte Prozesse gewonnen werden müssen, sind gewisse Sorten Kohlen, aus denen sie bei trockener Destillation (Schwelerei) erhalten werden, so die englische Cannel-, Boghead-, und vor allem die sächsische Braunkohle. Auch Destillation von bituminösen Schiefern, von Holz und Torf liefert etwas Paraffin. Im Steinkohlenteer findet sich das normale Dekan (B. 42, 3609). Der Braunkohlenteer ergibt bei der Fraktionierung unter Zuhilfenahme von alkalischen und sauren Waschungen und Bleichungen Braunkohlenbenzin, Solaröl (Sdp 175—260°; als Brennöl verwandt), schweres Paraffinöl, Weichparaffin, Hartparaffin. Nach B. 40, 4780 gelang es aus einem Braunkohlenparaffin 35 Homologe der Reihe C_{19} bis C_{36} zu isolieren. Physiologisch von Interesse, wenn auch nicht reichliche Mengen liefernd, ist das Vorkommen von Paraffinen in tierischen und pflanzlichen Produkten, so im Bienenwachs (C_{27}, C_{29}, C_{31}) und der wachshaltigen Cuticula der Pflanzen, in manchen Harzen und Balsamen, schließlich in Blüten (C_{27}—C_{32} C. 1910 II 1934) und anderen Pflanzen teilen; C_7 in den sogenannten Petroleumnüssen von Pinus Sabiniana,[1] C_{11} im Ameisenöl, C_{16} im Rosenöl, C_{20} in Bryoniablättern, C_{27} im Neroliöl usw.

Verwendung finden die Paraffine zur Beleuchtung, Heizung, speziell neuerdings als Motorspeismittel, die flüssigen als Lösungsmittel für Harze u. a. Stoffe, als Entstäubungsmittel beim Straßenbau, als Schmiermaterial und als Salbengrundlage.

B e l e u c h t u n g (vgl. auch den Artikel „L e u c h t g a s"). Das durch Destillation der Steinkohle gewonnene gewöhnliche Gas, zu Leucht- und Heizzwecken verwendet, enthält Methan als einzigen paraffinen Bestandteil zu 30 bis 40%. Bei der Verbrennung in gewöhnlichen Lampen alten Stils, die im wesentlichen einfache linienförmige Oeffnungen der Rohrleitung darstellen, wird es weder für Leucht-, noch für Heizzwecke in günstiger Weise ausgenutzt, da eine derartige Flamme Licht und Wärme zu gleicher Zeit, in einem nicht nach Belieben veränderlichen Verhältnis gibt. Das Methan, mit farbloser Flamme glatt zu CO_2 und H_2O verbrennend, kommt ausschließlich für die W ä r m e l i e f e r u n g in Betracht, die anderen beigemengten nicht paraffinen und schwereren Kohlenwasserstoffe dagegen verbrennen, indem sie dabei intermediär reichlich Kohle abscheiden, die zur Gelbglut erhitzt, die L e u c h t k r a f t erzeugt, wodurch aber gleichzeitig der Wärmewert der Verbrennung herabgedrückt wird. Nach beiden Richtungen ist es gelungen, Abhilfe zu schaffen. Die Vollständigkeit der Verbrennung wird in idealer, sehr einfacher Weise herbeigeführt durch Beimischung genügenden Luftsauerstoffs im sogenannten Bunsenbrenner, dadurch, daß das aus einer Düse in ein Brennerrohr unter genügendem Druck ausströmende Gas aus seitlichen Oeffnungen desselben atmosphärische Luft ansaugt und mitreißt. Für Verbesserung der Lichtausnützung kommen zwei Mittel in Betracht. Da das Leuchtgas nicht durch destruktive Vorgänge analog dem Crackingprozeß (vgl. S. 191) in besser leuchtende Gase überführbar ist, so kann man ihm durch den sogenannten Carburierungsprozeß Verbindungen mit hohem Kohlenstoffgehalt (z. B. Benzol) einverleiben, die bei der Verbrennung viel leuchtende Kohle ergeben. Ganz anders ist der Effekt, nämlich indirekt Licht erzeugend, in der sogenannten Gasglühlichtlampe, wo die hohe Verbrennungswärme des Methans und, infolge der Beimischung von Luft nach dem Bunsenbrennerprinzip, auch der anderen Kohlenwasserstoffe ausgenutzt wird zur Erhitzung bei hoher Temperatur Licht ausstrahlender anorganischer Stoffe (Oxyde der seltenen Erden). Aehnliches wie für Leuchtgas gilt auch für Petroleum, nur daß hier die Verhältnisse für die Lichtausnutzung in der gewöhnlichen Lampe, und für Benzine, wo sie für die nicht als Licht auftretende Energie günstiger liegen. Die Ausnützung dieser letzteren mit großem Nutzeffekt ist in den Petroleum- und Benzinmotoren der heutigen Automobil- und Luftfahrzeuge gelungen. Für Carburierung des Petroleums werden im Handel sogenannte Leuchtkugeln, meist aus Naphtalin bestehend, angeboten; für Verwendung nach dem Glühlichtprinzip hat man Lampen konstruiert, die aber, wohl wegen noch anhaftender Mängel (Kohleabscheidung und dadurch Vernichtung der Glühstrümpfe), keine starke Verbreitung besitzen.

Die öligen Kohlenwasserstoffe oder salbenartigen Kohlenwasserstoffgemische bilden überall da, wo Fette nur wegen ihrer physikalischen Eigenschaften Verwendung finden, deren natürlichen, vorteilhaften Ersatz. Einmal, weil sie den Nachteil der Fette, ihre

[1] C_7H_{16} riecht nach Bernthsen stark nach Orangen (vgl. Anm. S. 178) und bewirkt beim Einatmen Gefühllosigkeit.

leichte Zersetzbarkeit (Ranzigwerden) nicht zeigen und als Schmiermaterial gebraucht Metalle in keiner Weise angreifen. Ihr Schmierwert steht übrigens nach C. 1908 II 734 hinter dem der wasserstoffärmeren Kohlenwasserstoffe zurück. Weiterhin aber sprechen wirtschaftliche Gründe für ihre weitgehende Verwendung in genanntem Sinne, weil der Bedarf an Fetten animalischen, wie vegetabilischen Ursprungs für die menschliche Ernährung (Margarine), wie für die Seifenfabrikation gegenwärtig fast die ganze Produktion in Anspruch nimmt. Unter solchen Gesichtspunkten erscheint das gewiß nicht unlösbare Problem außerordentlich wichtig, direkt die relativ billigen Kohlenwasserstoffe in Fettsäuren zu überführen. Als Lösungsmittel für Harze und Verdünnungsmittel für Lacke finden Benzine dieselbe Verwendung wie Terpentinöl, sie sind aber ein minderwertiges Surrogat, insofern als ihnen die Fähigkeit des Terpentins ermangelt, durch Sauerstoffübertragung den Trockenprozeß zu beschleunigen. Als Fettextraktionsmittel und in chemischen Wäschereien wird Benzin in großer Menge verbraucht, wobei nur seine Feuergefährlichkeit von Nachteil ist (vgl. S. 197). — Paraffin und Ceresin finden zur Kerzenfabrikation in derselben Weise wie Stearin, oder besonders gern auch gemischt mit diesem Verwendung.

2d) Darstellung der Paraffine.

1. Eigentliche Synthesen, bei denen Neuknüpfung einer C—C-Bindung eintritt, also Darstellung aus Verbindungen mit niedrigerer C-Atomzahl.

a) An erster Stelle zu nennen ist hier die bereits oben berührte Reaktion nach Würtz, Behandlung der Halogenverbindungen besonders der Jodide (oder Bromide) der Kohlenwasserstoffe mit Na-Metall in ätherischer Lösung. Werden Jodide zweier verschiedener Radikale R_1 und R_2 verwandt, so können sich natürlich die drei Produkte $R_1—R_1$, $R_2—R_2$, $R_1—R_2$ bilden. Die Bedingungen der Reaktion müssen so gewählt werden, daß die Entstehung der ersten beiden möglichst hintangehalten wird. Dem Na analog wirkt Mg und Alkohol, doch entstehen hier bei den niederen Gliedern (kleiner als C_6) Kohlenwasserstoffe durch einfachen Ersatz des Halogens mit Wasserstoff (vgl. unten). Zink wirkt beim Erhitzen im geschlossenen Rohr; intermediär werden wohl immer metallhaltige Zwischenprodukte anzunehmen sein so bei Zink solche der Formel $Zn\langle^{R}_{J}$ und $Zn\langle^{R}_{R}$, die sich dann unter Bildung von ZnJ_2 und R—R zersetzen, indem Zinkalkyl und Jodalkyl aufeinander einwirken. Dem entspricht die Einwirkung fertiger Zinkalkyle auf Halogenalkyl

$$^{R}_{R}\rangle Zn + ^{J-R}_{J-R} = ZnJ_2 + 2\,R-R$$

Auch Mg wirkt zum Teil gemäß der Gleichung

$$2RJ + Mg \rightarrow MgJ_2 + R-R$$

die Hauptreaktion verläuft indes nach 2.

b) Elektrolyse der Carbonsäuren liefert Kohlenwasserstoff nach der Gleichung

$$2CH_3COOH \rightarrow H_2 + 2CO_2 + C_2H_6$$

Die beiden letzten Stoffe werden an der Anode abgeschieden.

c) Quartäre Kohlenwasserstoffe entstehen mit Zinkalkyl aus Ketonchloriden oder tertiären Jodiden, aus letzteren auch mit Zinkalkyljodid nach den Gleichungen oder Formeln

$$R_2C\,Cl_2 + Zn R_2 \rightarrow R_2CR_2 + ZnCl_2;$$

$$R_3CJ + JZnR \rightarrow R_2CR_2 + ZnJ_2;$$

$$R_3C\text{—}J + Zn + J\text{—}CR_3 \quad (R_3C+R \cdots Zn \cdots R+CR_3)$$

2. Darstellungen von Kohlenwasserstoff aus Derivaten gleicher C-Anzahl durch Reduktion. Als Derivate kommen in Betracht Halogen- und Sauerstoffverbindungen, ferner wasserstoffärmere Kohlenwasserstoffe (Olefine und Acetylene). Als Reduktionsmittel können dienen naszierender Wasserstoff, Zink und H_2O, Jodwasserstoff[1]) (mit oder ohne Zusatz roten Phosphors), verkupfertes Zink (Kupfer-Zinkpaar), Al oder Mg-Amalgam, Kaliumhydrid, elektrolytische Reduktion u. a. So lassen sich die Halogenide (am besten Jodide) reduzieren entsprechend den Gleichungen

$$RJ + H_2 \rightarrow RH + HJ; \quad RJ + HJ = RH + J_2$$

$$RJ + KH = RH + KJ$$

$$\left.\begin{array}{l} 2RJ + 2Zn \rightarrow ZnR_2 + ZnJ_2 \\ ZnR_2 + H_2O \rightarrow R_2H_2 + ZnO \end{array}\right\}$$

$$\left.\begin{array}{l} RJ + Mg(+ \text{Aether}) = MgRJ \\ MgRJ + H_2O = Mg(OH)J + RH \end{array}\right\} \text{nach Grignard}$$

Man kann auch ausgehen von den Alkoholen, die direkt mit Wasserstoff nicht reduzierbar sind, und ihre leichte Ueberführbarkeit in die Halogenverbindungen benutzen. Bei Anwendung von Jodwasserstoff verläuft diese Ueberführung und die Reduktion zum Kohlenwasserstoff in einer Reaktion, wenn durch Zusatz von rotem Phosphor das entstandene Jod in der wässerigen Lösung wieder in HJ verwandelt und so einer Hemmung der Reaktion infolge Umkehrbarkeit vorgebeugt wird

$$ROH + 2HJ \rightarrow RH + J_2 + H_2O$$

Mit dieser Abänderung gelingt übrigens auch Reduktion von Säuren und Ketonen

[1]) Jodwasserstoff ist ein besonders viel angewandtes energisches Reduktionsmittel für organische Verbindungen.

(letztere nach Ueberführung in die Ketonchloride durch PCl_5).

Infolge einer Nebenreaktion können, bei hoher Temperatur und katalytisch beeinflußt durch fein verteilte Substanzen wie Tonerde u. a., gesättigte Kohlenwasserstoffe auch aus den Alkoholen direkt entstehen. Der Alkohol spaltet nämlich nach zwei Richtungen: 1. in Olefin und Wasser, 2. in Aldehyd und Wasserstoff. Aus Olefin und Wasserstoff kann dann Paraffin entstehen. Eine solche Hydrierung der olefinischen Kohlenwasserstoffe C_nH_{2n} erfolgt allgemein bei Gegenwart von Nickel in geeigneter, fein verteilter Form schon bei etwa 300° leicht (Sabatier). Bei höheren Olefinen auch ohne Katalysatoren mit HJ im Einschlußrohr. Indirekt sind Kohlenwasserstoffe aus Aminen zu erhalten, nach vorheriger Ueberführung derselben in Alkohole mit salpetriger Säure. Durch Oxydation mit Ferricyanid in alkalischer Lösung sind sie auch aus Hydrazinen $RNH—NH_2$ zu gewinnen. Acetessigester und seine Homologen sind durch elektrolytische Reduktion in die entsprechenden Butane übergeführt worden. Die Hydrierung von Polymethylenen unter Ringsprengung ist nur bei Cyklobutan gelungen (B. 40, 3980).

3. Entstehung von Kohlenwasserstoff durch Abbau von Verbindungen mit höherer C-Atomzahl.

a) Die einzige wichtige in Betracht kommende Gewinnungsart ist die auch für die Kohlenwasserstoffe anderer Reihen gebräuchliche unter Abspaltung des Carboxyls von Säuren, nämlich durch Erhitzen ihrer Salze mit Basen (in der Regel Natronkalk), wobei deren kohlensaure Salze gebildet werden unter Entstehung von Kohlenwasserstoff.

$$RCOONa + NaOH \rightarrow Na_2CO_3 + RH$$

Man gelangt so zum Kohlenwasserstoff der nächst niederen Reihe, oder, da die Zahl der Carboxylgruppen keine Rolle spielt, von Dicarbonsäuren aus zu einer um 2 C ärmeren Reihe.

b) Zu erwähnen ist hier auch die Zersplitterung höherer Paraffine bei anhaltendem Sieden oder bei Ueberhitzung in ein niederes Paraffin und ein Olefin. Dieselbe Wirkung hat Erhitzen mit $AlCl_3$; Zersetzung gasförmiger Kohlenwasserstoffe durch glühendes Mg oder Al (B. 40, 2871). Eine Vereinigung der Reaktion nach a und b findet statt beim Erhitzen fettsaurer Erdalkalien. Bei 270° entstehen Paraffin, Ceresin und viscoses Oel (C. 1909, I 871). Eine Sprengung einer längeren Kette etwa einfach unter Addition von Wasserstoff

$$RCH_2—CH_2R_2 \rightarrow RCH_3 + R_2CH_3$$

ist nicht ausführbar. Allerdings erhält man aus Aethylen und Wasserstoff bei hoher Temperatur fast ausschließlich Methan.

c) Von Interesse ist die Beobachtung, daß die Hydrolyse von Ketonen durch Licht zur Spaltung in Säure und Kohlenwasserstoff führen kann

$$C_2H_5COCH_3 + H_2O \rightarrow C_2H_6 + CH_3COOH$$

(Ch. Z. 1910 Rep. 531).

3. Wasserstoffärmere, ungesättigte, aliphatische Kohlenwasserstoffe. 3a) Die Olefine C_nH_{2n} (Synonyma Aethylene, Aethene, Alkylene, Ene). Systematik, Konstitution und Isomerie. Wie anfangs erwähnt, haben alle hierher gehörigen Kohlenwasserstoffe dieselbe prozentige Zusammensetzung, sie können daher nicht durch Analyse, sondern nur durch die ihrer Derivate, z. B. der Bibromide unterschieden werden oder durch das Molekulargewicht. Der Name Olefine (Oelerzeuger) ist sehr alt und wurde ihnen gegeben am Ende des 18. Jahrhunderts als das erste Derivat der Reihe Aethylenchlorid, das „Oel der holländischen Chemiker" entdeckt worden war. Während die der Formel C_nH_{2n+2} entsprechenden Kohlenwasserstoffe zwar, wie oben erwähnt, zwei Unterabteilungen umfassen, die durch die Leichtigkeit der Einwirkung von Reagentien unterschieden sind, während sie aber doch andererseits eine deutlich zusammengehörige, von den anderen wasserstoffärmeren Kohlenwasserstoffen deutlich verschiedene Klasse bilden, zeigen sich, der Formel C_nH_{2n} entsprechend zusammengesetzt, zwei große Reihen, die nach ihrem ganzen Verhalten, Bildungsweisen und Zersetzungen, man möchte sagen, nicht das geringste miteinander zu tun haben. Die eine, an anderer Stelle dieses Werkes behandelte Gruppe zeigt größte Aehnlichkeit mit Paraffinen, und wird darum auch diesen analog formuliert als eine Aneinanderreihung von CH_2-Gruppen, der aber Anfang und Ende und somit die CH_3-Gruppen der Paraffine fehlen. Sie werden also formuliert als in sich geschlossene Ketten oder Ringe und führen den Namen Cykloparaffine, wodurch ihre Beziehungen einerseits zu den Paraffinen, andererseits zu den aromatischen Ringkohlenwasserstoffen zum Ausdruck kommen (vgl. den Artikel „Isozyklische Systeme"). Die andere Reihe, die der Olefine, ist durch sehr ausgesprochene Eigentümlichkeiten vor jenen beiden Kohlenwasserstoffreihen ausgezeichnet, vor allem durch ihre Fähigkeit andere Atome oder Atomgruppen, und zwar zwei einwertige Atome, oder ein in zwei einwertige Reste zerfallendes Molekül zu addieren. Wie der Vergleich der Formeln lehrt, gehen sie damit in Verbindungen über, die in der Zusammensetzung den Paraffinen oder ihren Derivaten entsprechen müssen und sich in der Tat als mit ihnen identisch erweisen:

$$C_2H_4 + H_2 = C_2H_6$$

$$\left.\begin{array}{l} C_2H_6 + Br_2 = HBr + C_2H_5Br \\ C_2H_4 + BrH = C_2H_5Br \end{array}\right\} \text{identisch}$$

Daraus ergibt sich die Möglichkeit die Konstitution der Olefine festzustellen, wenn die ihrer durch Addition entstehenden paraffinischen Derivate bekannt ist. Man bezeichnet Verbindungen, die erst durch Addition weiterer Bestandteile in „gesättigte" keinerlei Additionseigenschaften mehr zeigende Stoffe übergehen, als „ungesättigt". Ungesättigt in diesem weiteren Sinne sind dann auch alle Stoffe, die eine Gruppe enthalten, bei der zur Bindung zweier Elemente mehr wie eine ihrer Valenzen als beansprucht anzunehmen ist (z. B. die Gruppe C = O), soweit sie zu Additionsreaktionen befähigt sind (vgl. den Artikel „Aldehyde"). Bei den ungesättigten Kohlenwasserstoffen, den Olefinen, ist dies Bestreben sich durch Addition zu sättigen, meist sehr ausgeprägt. Sie addieren z. B. Wasserstoff,[1]) Halogen, Halogenwasserstoff sowohl wie auch Sauerstoff (in Form von H_2O_2, Ozon), Wasser, HOCl u. a., wobei manche Sauerstoffadditionsprodukte leicht weiter gespalten werden in mehrere Produkte mit niedrigerer C-Atomzahl. Bei Abwesenheit addierbarer Substanzen besitzen ihre Moleküle die Fähigkeit miteinander zu reagieren durch Selbstaddition, sie „polymerisieren" sich. Als wichtigste Reaktion, zur Erkennung des ungesättigten Charakters und zum Unterschied von Paraffinen, Cykloparaffinen und aromatischen Kohlenwasserstoffen, dient die momentan eintretende Entfärbung von Brom (ohne gleichzeitigen Austritt von HBr) in Chloroformlösung, sowie die von sodaalkalischer Permanganatlösung unter gleichzeitiger Bildung von Braunstein (v. Baeyersches Reagens). Zunächst entstehen dabei nachweislich Glykole, weiterhin tritt Spaltung am Ort der Doppelbindung ein. Beide Reagentien sind zwar auch auf andere Kohlenwasserstoffe nicht ganz ohne Einwirkung, so Brom z. B. auf Paraffine (aber durch Substitution), Permanganat auf Alkohole usw.; die Einwirkung findet aber dort unvergleichlich viel langsamer statt. Die Einwirkung freien Halogens ist ferner bei Paraffinen immer von HBr-Entwickelung begleitet und dadurch deutlich von der bloßen Halogenaddition der Olefine unterschieden. Die Permanganatentfärbung beweist Anwesenheit ungesättigten Kohlenwasserstoffs natürlich nur für den Fall der Abwesenheit anderer reduzierender Gruppen wie z. B. der Aldehydgruppe $-C\begin{smallmatrix}\diagup H\\ \diagdown O\end{smallmatrix}$.

Das geschilderte Verhalten der Olefine hat zu Vorstellungen über die Konstitution geführt, die in dem Formelsymbol der doppelten Bindung C = C ihren Ausdruck finden, d. h. zu der Annahme, daß zwei benachbarte C-Atome weniger Wasserstoff gebunden enthalten als ihrer Vierwertigkeit entspricht, und sich statt dessen durch zwei ihrer Valenzen gegenseitig absättigen und binden. Diese Annahme stößt auf Schwierigkeiten der Vorstellbarkeit, insofern als nach gewöhnlichen Begriffen eine doppelte Bindung die einfache an Festigkeit übertreffen müßte, während die ungesättigten Verbindungen gerade das entgegengesetzte Verhalten zeigen. Der Widerspruch erklärt sich dadurch, daß die Bindung zwischen zwei Atomen nicht als starr zu betrachten ist, sondern daß die gebundenen Atome Bewegungen um eine Gleichgewichtslage ausführend gedacht werden. Es läßt sich verstehen, daß durch eine zweite „Bindung" die Atome in der ihnen natürlichen Beweglichkeit gehindert werden, und daß davon Spannungen oder Zerrungen die Folge sind. Faßt man das C-Atom als Tetraeder auf, in dem die Valenzen durch die Verbindungslinien des Zentrums mit den Ecken dargestellt werden, so kann das Bild der einfachen Bindung dargestellt werden durch zwei sich mit den Spitzen berührende, frei um einander drehbare Tetraeder, das der doppelten Bindung dagegen durch zwei mit der Kante aneinander gelagerte derartige Körper, die nur nach einer Richtung noch drehbar, also in ihrer Beweglichkeit gehemmt sind. Baeyer macht die Annahme, „daß die Richtung der Valenzen des C-Tetraeders eine Ablenkung erfahren kann, die jedoch ein mit der Größe der letzteren wachsende Spannung zur Folge hat. Bei einfacher Bindung bilden die Valenzen zweier aneinander gebundener C-Atome eine gerade Verbindungslinie, bei mehrfacher müssen die Valenzen so weit abgebogen werden, bis sie der Verbindungslinie zwischen den Schwerpunkten der tetraedrischen Atome parallel sind. (Spannungstheorie v. Baeyers; zur Anwendung derselben auf Ringsysteme vgl. den Artikel „Benzolgruppe"). Es bleibt noch die Frage zu beantworten, warum nicht andere naheliegende Möglichkeiten zur Formulierung herangezogen werden, so die mit drei- oder zweiwertigem Kohlenstoff oder mit freien Valenzen[1]) z. B.

$$CH_3-CH-CH-CH_3$$

$$\text{oder } CH_3-\underset{|}{CH}-\underset{|}{CH}-CH_3$$

Beide finden Analogien in zahllosen Beispielen der anorganischen Chemie und in den für Kohlenoxyd und Blausäure (C = NH) angenommenen Formeln, und beide würden die Additionsreaktionen in geeigneter Weise zu erklären vermögen. Gegen die Wahr-

[1]) Ueber Schwierigkeit der Addition von Wasserstoff gegenüber der von Halogen vgl. S. 189.

[1]) Beides läuft im Grunde auf dasselbe hinaus. Man kann Ferrosulfat ebensogut $Fe=SO_4$ wie $Fe=SO_4$ formulieren.

scheinlichkeit der Existenz dreiwertigen Kohlenstoffs oder freier Valenzen spricht schon das Gesetz der „paaren Atomzahl", d. h. der Nichtexistenz von Kohlenwasserstoffen der Formel C_nH_{2n+1}, C_nH_{2n-1} usw. oder der freien Radikale, d. h die Tatsache, daß solche wasserstoffärmere C-Atome nur paarweise, zu zweien auftreten und nie einzeln; auch die nachweisliche Unmöglichkeit, trotz vieler angestellter Versuche ein Methylen CH_2 darzustellen (Letzter derartiger Versuch B. 44, 2194 Staudinger). Das Gesetz der paaren Atomzahl ließe noch zu, daß an zwei voneinander getrennten Stellen des Moleküls oder gehäuft an einer Stelle C-Atome mit weniger als vier Valenzen, oder solche mit freien Valenzen wären, entsprechend Formeln wie $CH_3—CH—CH_2—CH—CH_3$ oder $CH_3—CH=$ oder $CH_3—\underset{\Vert}{C}—CH_3$. Allein abgesehen davon, daß die Zahl der hiernach sich berechnenden Isomeren unendlich viel größer sein müßte, als sie in der Tat ist — es gibt z. B. nur einen Kohlenwasserstoff Aethylen C_2H_4; das Aethyliden $CH_3—CH=$ ist nicht bekannt, es existiert nicht frei, sondern nur als Radikal — ist für die bekannten ungesättigten Kohlenwasserstoffe das Gegenteil streng beweisbar, nämlich daß die Ungesättigtheit oder der Wasserstoffmangel immer an zwei benachbarten C-Atomen des Moleküls gleichmäßig konzentriert ist. Beweisbar, weil über die Konstitution der Additionsprodukte, als Derivate der Paraffine, die auch auf anderem Wege zugänglich sind, kein Zweifel ist, und weil als einfachste die Annahme gemacht wird, daß die Addenden an den Ort der Wasserstofflücken treten, ohne weitere Atomverschiebung. Es zeigt sich nun, daß die beiden Addenden immer an zwei benachbarte C-Atome treten. Andererseits zeigt sich, daß umgekehrt Abspaltungen wie z. B. die von HBr nur an zwei benachbarten C-Atomen vor sich gehen können und daher z. B. an Verbindungen wie

$$(CH_3)_3{>}C—CH_2Br$$

nicht ausführbar sind. In Gegensatz zu diesen Einwänden ist nun andererseits die Annahme der doppelten Bindung imstande, die Zahl der gefundenen Isomeren richtig zu erklären und voraus zu berechnen. Will man aber unter Verzicht auf eine Erklärung annehmen, daß „aus irgendeinem Grunde" ungesättigte Kohlenwasserstoffe nur mit zwei benachbarten, wasserstoffärmeren C-Atomen oder einem als Ganzes reagierenden C-Atompaar existieren, so ist klar, daß dann die Formulierung $\underset{|}{C}H_2—\underset{|}{C}H_2$ mit „Lückenbindung" (Werner) dieselbe Berechtigung hat, wie die mit doppelter Bindung, womit die Formulierung der organisch ungesättigten Verbindungen sich ganz der der anorganischen niederen Oxydationstufen an die Seite stellt. Allgemein neigen neuere theoretische Anschauungen, auf Grund unten geschilderter Tatsachen dazu, die Valenzen nicht mehr als gerichtete Einzelkräfte aufzufassen, wie dies die klassische Auffassung der Doppelbindung voraussetzt, und eine Formulierung durchzuführen, die zwischen beiden obigen die Mitte hält; man nimmt an, daß die zweite Valenz bei der Doppelbindung nur zum Teil verbraucht wird, und daß freie „Partialvalenzen" übrig bleiben (Thiele, Annal. 306; Ausdehnung dieser Ansicht auf mehrere sich beeinflussende Doppelbindungen; konjugierte, gekreuzte, Zwillings-, Benzoldoppelbindung). Diese Ansicht ist geeignet, zu erklären, warum hinsichtlich der Addition zwischen verschiedenen, oft sehr ähnlichen ungesättigten Verbindungen, wie beobachtet, starke Unterschiede obwalten, ferner auch warum bei mehreren Doppelbindungen im Molekül, die Wirkung sich bisweilen nicht einfach addiert, sondern, je nach der Lage, abschwächen oder verstärken kann. Dazu kommt, daß Forschungen neuster Zeit die wenigstens vorübergehende Existenz freier Radikale mit zwei- und dreiwertigem Kohlenstoff experimentell wahrscheinlich gemacht haben, wodurch gewisse zur Erklärung von komplizierteren Reaktionen schon früher z. B. von Nef gemachte Annahme gestützt worden sind (vgl. dazu den Artikel „Valenzlehre").

Auf Grund der gewonnenen Vorstellung über die Formel der ungesättigten Kohlenwasserstoffe läßt sich nun die Zahl der möglichen Isomeren berechnen. Sie hat sich mit der der wirklich darstellbaren übereinstimmend gezeigt, worin eine starke Stütze für die Richtigkeit der Formulierung erblickt werden kann. Die Zahl ist erheblich größer als bei den Paraffinen, denn außer allen dort möglichen Isomerien kommt hier noch hinzu die durch verschiedene Lage der Doppelbindungen verursachte, sowie die durch verschiedene Anordnung im Raum bedingte Stereoisomerie. Diese räumliche, sogenannte cis-trans-Isomerie tritt ein, wenn jedes der beiden C-Atome mit zwei verschiedenen Substituenten verbunden ist entsprechend dem Schema

$$\begin{matrix} C^a_b & & C^a_b & & C^a_b \\ \Vert & \text{oder} & \Vert & \text{oder} & \Vert \\ C^a_b & & C^a_c & & C^c_d \end{matrix}$$

Jedes davon kann zwei Stereoisomere bilden z. B.

$$\begin{matrix} a & | & b & \qquad & a & \Vert & b \\ a & | & b & \qquad & b & & a \end{matrix}$$

Bei Ueberführung in Paraffin durch Addition verschwindet diese Isomerie, wenn die Addenden gleich sind; sind sie dagegen verschieden, so entstehen zwei asymmetrische C-Atome und die Stereoisomerie bleibt auch in den Paraffinderivaten erhalten. Die Entscheidung, welches Isomere der cis- und welches der trans-Form entspricht ist meist nicht leicht. Sie gründet sich auf die Annahme, daß Abspaltungen (z. B. Anhydridbildung) besonders leicht bei Derivaten der cis-Formen eintreten werden.

Den 2 Butanen entsprechen 3 Butylene

$CH_3CH_2CH_2CH_3 \rightarrow CH_2=CH\ CH_2CH_3$
$\rightarrow CH_3-CH=CH-CH_3$ (2 stereomere Formen)

$CH_3-CH(CH_3)-CH_3 \rightarrow CH_2=C(CH_3)-CH_3$

Den 3 Pentanen entsprechen 5 Amylene (Pentene), den 5 Hexanen 13 Hexylene usw. Bis C_{12} sind mehrere der möglichen Isomeren wirklich bekannt, weiter hinauf kennt man meist nur ein Glied, und oberhalb C_{20} sind unsere Kenntnisse gegenüber der großen Zahl der bei Olefinen möglichen Isomeren sehr lückenhaft.

Die Feststellung der Lage der Doppelbindung gründet sich auf die der Konstitution bekannter paraffiner Ausgangsstoffe zur Gewinnung der Olefine[1]) oder die bekannter Reaktionsprodukte bei Abbau durch Oxydation oder bei Derivaten durch Addition. Z. B. liefert von Hexenen bei der Oxydation

$CH_3CH_2CH_2CH=CHCH_3$: Essigsäure und Buttersäure

$CH_3CH_2CH=CHCH_2CH_3$: 2 Moleküle Propionsäure

$(CH_3)_2C=C(CH_3)_2$: 2 Moleküle Aceton.

Die Namen der Olefine werden gebildet nach alter Weise durch Ersatz der Paraffinendung an mit ylen; nach den Genfer Beschlüssen dagegen einfach mit en; sonst in der für Paraffine erläuterten Weise[2]) (Aethylen oder Aethen, Propylen oder Propen, Pentylen oder Penten, gewöhnlich Amylen genannt usw.). Nach der Lage der doppelten Bindung unterscheidet man die Isomeren z. B. als Normal- oder α-Butylen, Pseudo- oder β-Butylen, Iso- oder γ-Butylen (vgl. die obigen dieselbe Reihenfolge einhaltenden Formeln). Die Genfer Nomenklatur kennzeichnet den Ort der Doppelbindung durch beigesetzte Ziffer ihres ersten C-Atoms; Zählbeginn an dem der Doppelbindung nächsten Ende der Kette

$CH_3-CH=CH-CH_2-CH_3$ 2-Penten

$CH_2=CH-CH=CH_2$ 1,3-Butadiën

außer wenn das allgemeine Prinzip der Benennung des C-Skeletts wegen vorhandener Seitenketten vorschreibt, am anderen Ende mit dem Zählen zu beginnen, z. B.

$CH_3-CH(CH_3)-CH_2-CH=CH_3$ 2 Methylpenten 4

Häufig ergibt sich eine einfache Benennung dadurch, daß man den Kohlenwasserstoff als aus zwei geeignet scheinenden Resten (Radikalen) zusammengesetzt denkt, z. B. Di-iso-butylen, Triamylen usw., oder indem man alles auf Aethylen als Stammsubstanz zurückführt, z. B.

$(CH_3)(C_2H_5)C=CH_2$ as-Methyläthyläthylen

Das Radikal $CH=CH_2$ führt den alten Namen Vinyl (= Aethenyl). Namen wie Propenyl usw. bedürfen keiner Erklärung.

Physikalische und chemische Eigenschaften. In den physikalischen Eigenschaften sind die Olefine nicht sehr verschieden von den Paraffinen. Von C_5 bis C_{18} hat man es unter den Bedingungen unseres Klimas mit Flüssigkeiten zu tun. Die Siedepunkte der Kohlenwasserstoffe gleicher C-Atomzahl, gesättigter wie ungesättigter, liegen meist ziemlich dicht beieinander. Das spezifische Gewicht der Olefine ist höher als das der Paraffine gleicher C-Zahl. Im Unterschied von Paraffinen brennen die kohlenstoffreicheren Olefine mit leuchtender, rußender Flamme. Ihre Entzündungstemperatur liegt tiefer als die der Paraffine. Die Unterschiede zwischen Paraffin und Olefin verwischen sich, je höher die C-Zahl steigt, mehr und mehr. Der Einfluß der Doppelbindung auf das Ganze des Moleküls tritt zurück.

Was das chemische Verhalten anlangt, so ist der paraffine Teil der C-Kette genau in derselben Weise veränderlich wie die Paraffine selbst. Indessen sind Reaktionen zu seiner Umbildung, die gleichzeitig die Doppelbindung intakt lassen, wenig bekannt. Chlorpropylen CH_3-$CCl=CH_2$ wird durch Chlor im Dunkeln substituiert, im Licht tritt Addition ein.

Darstellung, Abspaltungs- und Additionsreaktionen. Von Synthesen oder Bildungsweisen können hier einige genannt werden, die völlig den entsprechenden der Paraffine analog sind, so die Gewinnung a) aus den Salzen der gesättigten Dicarbonsäuren durch Elektrolyse

$$COOH-CH_2-CH_2-COOH \rightarrow CH_2=CH_2 + 2CO_2 + 2H$$

b) durch gemäßigte H-Addition an wasserstoffärmere Kohlenwasserstoffe (Acetylene);

[1]) In Ausnahmefällen treten indes Verschiebungen der Doppelbindung ein.

[2]) Vgl. den Artikel „Systematik und Nomenklatur der organischen Verbindungen".

c) aus Halogenverbindungen gemäß der Wurtzschen Reaktion, wenn in der Reaktion

$$R_1J + R_2J + 2Na = 2NaJ + R_1\text{-}R_2$$

das eine R eine C=C-Gruppe getrennt von dem Halogen enthält

$$CH_2{=}CHCH_2J + CH_3J + 2Na \rightarrow CH_2{=}CHCH_2CH_3 + 2NaJ$$

Allyljodid

Handelt es sich um zwei derartige ungesättigte Halogenverbindungen, sind die beiden R einander z. B. gleich, so entsteht ein Kohlenwasserstoff der nächst niederen Reihe C_nH_{2n-2}, ein Diën z. B. $2CH_2{=}CH\text{-}CH_2J + 2\,Na = 2NaJ +$ Diallyl; d) aus gesättigten Dihalogenverbindungen durch einfache Wegnahme des Halogens und zwar aus symmetrischen mit Zn[1]); mit Na aus unsymmetrischen z. B. $CH_3{-}CHCl_2 + 2Na = 2NaCl + CH_2{=}CH_2$. Bei ungesättigten Halogenverbindungen, wo das Halogen selbst an olefinischem Kohlenstoff gebunden, ist es schwerer in Reaktion zu bringen z. B. mit Na; sie reagieren aber mit Zinkalkyl

$$CH_2{=}CHBr + ZnR_2 \rightarrow CH_2{=}CHR + Zn{<}^{R}_{Br}$$

Da die anderen auf Abspaltungen beruhenden Bildungs- und Darstellungsweisen aus Paraffinderivaten alle die Umkehrung von Additionsreaktionen sind, die die entstehenden Olefine zeigen, so scheint es geraten beide an dieser Stelle zusammen zu besprechen. Die Leichtigkeit von Addition und Abspaltung ist bei den verschiedenen Reaktionen verschieden, jedoch derart, daß leichter Abspaltung meist auch leichte Addition entspricht. Während aber die Additionen häufiger von selbst eintreten, sind die Abspaltungen mehr Zwangsreaktionen. Die Leichtigkeit hängt ab von der Natur der Addenden und der der organischen Verbindung. Bei Halogenwasserstoffen steigt die Neigung zur Addition, wie zur Abspaltung, von HCl zum HJ. Freies Halogen verhält sich nur in bezug auf Abspaltung ebenso. Nach ihrer Neigung zur Addition ordnen sich die Halogene grade umgekehrt $Cl > Br > J$. Diese Neigung ist bei Jod so gering, das s-$C_2H_4J_2$ und $C_3H_6J_2$ sehr unbeständig sind, und daß Acetylene nur zwei Atome Jod aufnehmen. HJ dagegen addiert sich äußerst leicht, und ebenso leicht erfolgt seine Abspaltung, so daß diese die beste Darstellungsweise für Olefine bildet. Der Einfluß der organischen Komponente bei der Reaktion zeigt sich darin, daß die Reaktionsfähigkeit mit der H-Armut der C-Atome zunimmt, daß daher wie auch bei den Paraffinen bemerkt wurde, verzweigte Ketten leichter als gerade reagieren. Verbindungen vom Typus $CH_2{=}CR_2$ und $CHR{=}CR_2$ addieren HCl schon in der Kälte, $RCH{=}CHR$ schwerer, $CH_2{=}CHR$ erst bei höheren Temperaturen, und am schwersten das wasserstoffreiche Aethylen selber. Bei der Addition von HJ ist die Verschiedenheit so groß[1]) daß man isomere Kohlenwasserstoffe auf diesem Wege trennen kann, wenn das durch die Reaktion gebildete tertiäre Halogenderivat und das ursprüngliche nicht angegriffene Isomere des Kohlenwasserstoffs große Siedepunktdifferenzen zeigen. Das Additionsvermögen läßt sich messen durch die Geschwindigkeit der Auflösung in konzentrierter H_2SO_4, ein Vorgang, der auch zu einer, allerdings nicht ganz streng quantitativen Trennung von Paraffinen benützbar ist. So gemessen ergibt sich das Verhältnis von Amylen: 1-Buten wie 5 : 7, das von 2-Penten : Trimethyläthylen wie 1 : etwa 100 (C. 1911, II 122).

Sind die Addenden gleich wie bei freien Halogenen, z. B. Cl—Cl, so kann Addition und Abspaltung offenbar nur in einem Sinne erfolgen. Sind die Addenden ungleich, so ist a) bei primären Derivaten Abspaltung wieder nur in einem Sinne möglich

$$CH_2X-CH_2-CH_2R \rightarrow CH_2{=}CH_2\quad CH_2R$$

Die Addition dagegen kann zu den beiden Produkten

$CH_3{-}CHX{-}CH_2R$ und $CH_2X{-}CH_2{-}CH_2R$ führen. In der Tat finden zwar nachweislich beide Reaktionen statt, aber in sehr viel größerem Betrage die, bei der das X eines Addenden HX an das wasserstoffärmere C-Atom wandert, gleichgültig welchen Platz es vor der Abspaltung aus der paraffinen Verbindung eingenommen hat, z. B

$$CH_3J-CH_2\quad CH_3 \rightarrow CH_2{=}CH\quad CH_3 \rightarrow CH_3{-}CHJ{-}CH_3$$

Auf diese Weise ist ein wichtiger Uebergang möglich von primären zu sekundären Derivaten. Je ähnlicher die beiden Bestandteile eines Addenden, um so gleicher sind die gebildeten Mengen der beiden Isomeren. Ein analoger Uebergang findet bei manchen Halogenderivaten durch einfache Umlagerung statt (vgl. S. 199), HCl addiert sich mehr in einem Sinne, HBr liefert zwei Isomere gleichzeitig, nämlich bei Verwendung nicht zu starker Säure das reguläre Reaktionsprodukt $CH_3{-}CHBr{-}R$, während mit sehr konzentrierter Säure $CH_2Br{-}CH_2{-}R$ erzeugt werden kann. b) Bei sekundären Derivaten kann sowohl Abspaltung wie Addition in zweierlei Sinn verlaufen und zwar gemäß dem Schema

---

[1]) Aus symmetrischen Dibromiden mit Na erst bei den höheren Gliedern leicht. $CH_2Br{-}CH_2Br$ wird bei 200—300° von Na kaum angegriffen.

[1]) An Kohlenwasserstoff mit H-freiem C-Atom addiert sich HJ noch bei —20°. Die Abspaltung andererseits erfolgt bei tertiären Jodiden schon mit alkoholischem Ammoniak.

$$CH_3CHXCH_2CH_2R \longrightarrow CH_3CH=CHCH_2R,\ CH_2=CHCH_2CH_2R \;\left| \begin{matrix} + \\ HX \end{matrix} \right. \longrightarrow CH_3CH_2CHXCH_2R,\ CH_3CHXCH_2CH_2R,\ CH_2XCH_2CH_2CH_2R$$

Die punktierten Pfeile deuten dabei die Nebenreaktion, die anderen die Hauptreaktion an.

Von Wichtigkeit sind folgende umkehrbaren Reaktionen:

a) Olefin + $X_2 \rightleftarrows$ Disubstituiertes Paraffinderivat.

b) Alkohole $\rightleftarrows$ Olefin + H_2O.

c) Halogenalkyl $\rightleftarrows$ Olefin + Halogenwasserstoff.

d) Andere Additionen und Abspaltungen.

e) Einfaches Olefin $\rightleftarrows$ polymerisiertes Olefin.

Die der schon mehrfach erwähnten Halogenaddition als Umkehrung entsprechende Dissoziation von Dihalogeniden in Olefin und freies Halogen erfolgt leicht bei Jodiden. $CH_2J—CH_2J$ spaltet schon bei 80°. Bei Chloriden ist sie, auch bei Gegenwart von Katalysatoren, schwerer oder nicht ausführbar. Dagegen läßt sich die Halogenentziehung mit Reagentien, am besten mit Zinkstaub und Alkohol, ausführen. Bei Einwirkung von Chlor auf Olefine können nebenher Monosubstitutionsprodukte von Olefinen und Paraffinen entstehen, letztere weil die gesättigten Dihalogenverbindungen auch HCl abspalten, und dieses sich an intaktes Olefin addieren kann. Auch höher chlorierte Verbindungen können sich leicht unter den Produkten der Reaktion finden, während dies bei der Bromierung nicht der Fall ist.

Während die pyrogen erfolgende Abspaltung von Wasserstoff als glatte Reaktion wegen mannigfacher Komplikationen durch andere Reaktionen sich anscheinend überhaupt nicht verfolgen läßt, findet die umgekehrte Reaktion, Anlagerung von H_2, allerdings nur unter richtigen Bedingungen und nicht entfernt mit der Leichtigkeit, wie Halogen- oder Halogenwasserstoffaddition, statt. Mittel zu einer solchen Hydrogenisation der C=C-Gruppe sind Jodwasserstoff, Natrium und Amylalkohol, elektrolytische Reduktion, vornehmlich aber Gegenwart besonderer die Wasserstoffaufnahme begünstigender Katalysatoren (Ueberleiten des mit H_2 gemischten Dampfes über fein verteiltes Nickel (Sabatier) langes Einleiten von H_2 in die mit feinem Katalysatormetall (Pt oder Pd) gemischte erhitzte Substanz (Willstätter), Schütteln des Kohlenwasserstoffs in H_2-Atmosphäre mit einer Adsorptionsverbindung aus kolloidalem Palladium und Protalbinsäure u. a.).

Abspaltung und Addition von H_2O und Halogenwasserstoff. Anwendung der ersteren zur Olefingewinnung. Bei bloßem Erhitzen tritt die Reaktion der Abspaltung vor allem ein bei Tertiärderivaten, besonders Alkoholen; von sekundären spaltet Butylalkohol bei 240° Wasser ab. In anderen Fällen bleibt die Reaktion leicht unvollständig; das Gleichgewicht wird aber schneller erreicht durch Zusatz von Katalysatoren, oder von Mitteln, die eines der Reaktionsprodukte binden, so von konzentrierter H_2SO_4 oder H_3PO_4, von $ZnCl_2$, $KHSO_4$, wasserfreier Oxalsäure, Essigsäure und Na-acetat (auch $COCl_2$ für tertiäre Alkohole) zur Bindung des Wassers; von KOH in Alkohol gelöst (= KOC_2H_5) auch wohl von anderen Basen wie Chinolin zur Bindung von Halogenwasserstoff. In der Wahl der Katalysatoren, über die man gewöhnlich den Alkoholdampf bei erhöhter Temperatur streichen läßt, herrscht die größte Mannigfaltigkeit. Man findet erwähnt Zinkstaub, Quarzsand, Kaolin, Bimstein usw. Bei manchen derselben erfolgt auch ein Zerfall des Alkoholmoleküls in ganz anderer Richtung, nämlich in Aldehyd und Wasserstoff. Diese leicht erfolgende Spaltung ist das völlige Analogon zu der schwer durchführbaren Dissoziation des Paraffins in Olefin + H_2.

$$\text{Vgl. } \underset{H_2}{-C}-\underset{H}{O} \rightarrow \underset{H}{C}=O + H_2$$

$$\text{und } \underset{H_2}{-C}\ \underset{H_3}{C} \rightarrow \underset{H}{C}=\underset{H_2}{C} + H_2.$$

Je nach Wahl der Katalysatoren geht die Abspaltung bald mehr im einen, bald mehr im anderen Sinne. Schließlich kann auch unter dem Einfluß von Katalysatoren ein Zerfall eintreten, der zur Aetherbildung unter Wasserabspaltung führt.

Bei der wichtigsten Darstellung der Olefine, der aus Alkohol mit konzentrierter H_2SO_4 wird als Nebenreaktion bei primären, weniger bei sekundären, gar nicht bei tertiären Alkoholen Aether gebildet. Zwischenprodukt ist bei beiden Reaktionen Aetherschwefelsäure, die nach zwei Richtungen zerfallen kann

$$CH_3—CH_2OH \rightarrow CH_3—CH_2OSO_3H$$

$$CH_3CH_2OSO_3H \rightarrow CH_2=CH_2 + H_2SO_4$$

$$\text{,,} \quad + CH_3CH_2OH \rightarrow (CH_3CH_2)_2O + H_2SO_4$$

Von beiden Reaktionen ist nur die erste leicht umkehrbar: Die Alkylene lösen sich in konzentrierter H_2SO_4; bei Zusatz von Wasser und Erwärmen entstehen dann Paraffinalkohole. Dies ist die stufenweise Umkehrung

der obigen Reaktion. Zu dieser Hydratation der Alkylene genügt bei solchen vom Typus $CR_2 = CH_2$ schon verdünnte Schwefel- oder sogar Salpeter- oder Oxalsäure. Bei Verwendung konzentrierter H_2SO_4 können Komplikationen eintreten bei den Kohlenwasserstoffen von C_4 an durch Polymerisation der gebildeten Olefine (Butylen zu Di- und Tributylen). Weiter können dabei Umlagerungen unter Verschiebung der Doppelbindung und Isomerisierung der C-Kette (verzweigte $\lessgtr$ normale) eintreten. Alkylene neben Wasser entstehen als Nebenprodukte statt der Alkohole auch bei sonstigen Reaktionen, so bei Gewinnung aus primären Aminen mit HNO_2. Das Diamin $NH_2(CH_2)_5NH_2$ liefert alle drei möglichen Produkte nebeneinander nämlich

$$CH_2{=}CH{-}CH_2{-}CH{=}CH_2;$$
$$CH_2{=}CH{-}CH_2{-}CH_2OH$$
und $CH_2OH{-}CH_2{-}CH_2{-}CH_2{-}CH_2OH$.

Von Halogenderivaten eignen sich am besten die jodhaltigen zur Olefindarstellung, und wie bei den Alkoholen speziell die tertiären oder auch sekundären. Bei Chloriden und primären Derivaten treten auch hier Aether als Nebenprodukte auf:

$$CH_3{-}CHJ{-}CH_3 + KOC_2H_5 \rightarrow$$
$$CH_3{-}CH{=}CH_2 + KJ + C_2H_5OH$$
$$CH_2Cl{-}CH_2{-}CH_3 + KOC_2H_5 \rightarrow$$
$$(CH_3{-}CH_2{-}CH_2)O(CH_2CH_3) + KCl$$

Eine dritte Abspaltungsreaktion, besonders zur Darstellung höherer Alkylene verwendbar, ist die von Säure aus ihren Estern bei Destillation unter vermindertem Druck. Man pflegt Palmitate oder Stearate zu verwenden. Auch diese Reaktion ist umkehrbar, insofern als Ester durch Addition organischer Säuren (resp. ihrer Chloride oder Anhydride) an Alkylene entstehen können. Die gewöhnliche Aethylendarstellung stellt sich danach als eine einfache Dissoziation des Aethylsulfates oder Aethylphosphates dar. Aus manchen Säuren lassen sich Olefine gewinnen auch beim Erhitzen mit trockenem Zn-Staub bei 400° (C. 09, I 736)

$$CH_3CH_2COOH \rightarrow CH_2{=}CH_2 + CO_2 + H_2.$$

(Die Verwirklichung der umgekehrten Reaktion würde eine Lösung des oben berührten Problems der künstlichen Darstellung von Fettsäuren bedeuten.)

Von sonstigen Additionen, deren Umkehrungen durch Dissoziation sämtlich sehr leicht erfolgen, seien genannt die von N_2O_3 und N_2O_4 (als $NO_2{-}NO$ und $NO_3{-}NO$ gibt Nitrosite und Nitrosate); von NOCl, von HOCl (als OH—Cl gibt Chlorhydrine); von H_2O_2 (als OH—OH gibt Glykole); von Ozon (gibt bei Abwesenheit von Wasser Ozonide

```
 -CH—CH-
 O/     \O
   \   /
    O
```

die mit Wasser Spaltung am Ort der Doppelbindung in Aldehyd oder Keton und H_2O_2 erleiden). CH_3J addiert sich an β-iso-Amylen zu $(CH_3)_2CJ{-}CH(CH_3)_2$[1]. Nur ganz kurz erwähnt seien die Additionen von Merkaptanen RSH, von Aldehyden, Ketonen (allmählich im Licht C. 09 II 195) Ketenen, CuCl, $PtCl_2$, $ZnCl_2$, Hg-Salzen u. a. Verbindungen mit Eisen können im gewöhnlichen Handelseisen angenommen werden, wenigstens enthalten die beim Uebergießen mit Säure entweichenden stark riechenden Gase auch Aethylenkohlenwasserstoffe. Kohlenwasserstoffe mit Doppelbindungen, darunter aber auch solche der aromatischen Reihe, besitzen die Fähigkeit mit Polynitroverbindungen, besonders Tetranitromethan farbige Additionsprodukte zu geben (B. 42, 4324). Manche der letztgenannten Verbindungen sind wohl mehr koordinativer Natur im Sinne Werners. Addition wieder anderer Art, vielleicht nur physikalische Adsorptionsverbindungen wird man annehmen müssen zur Erklärung der Tatsache, daß aus einem Kohlenwasserstoffgemisch gewisse Tone (Rohland Z. f. anorg. 65, 108) nur ungesättigte Kohlenwasserstoffe beim Filtrieren zurückhalten. Diese Beobachtung ist für mögliche sekundäre Veränderungen der Zusammensetzung des Erdöls im Boden wichtig.

Auch untereinander können sich ungesättigte C-Systeme addieren. Aethylen und Acetylen zusammen durch ein glühendes Rohr geleitet vereinigen sich zum Teil zu Divinyl oder Butadien $CH_2{=}CHCH{=}CH_2$. Bei Abwesenheit aller anderen Reagentien kann Selbstaddition oder Polymerisation besonders bei den iso-Olefinen eintreten, bei langem Aufbewahren oder schneller unter dem Einfluß von H_2SO_4, $ZnCl_2$, $AlBr_3$ u. a. als Kondensationsmitteln. Dabei entstehen Di- und Trimere von der Formel $(C_nH_{2n})_{2 \text{ oder } 3}$. Je konzentrierter die Säure, umso stärker ist die Polymerisation. In den Reaktionsprodukten ist das Verhältnis C_nH_{2n} unverändert, sie sind daher, wenn sie noch additionsfähig sind, ebenfalls als Aethylenverbindungen, wenn auch als weniger stark ungesättigte dem Monoolefin gegenüber aufzufassen. Der Einfluß der Doppelbindung auf das Ganze des Moleküls tritt wieder mit steigendem Molekulargewicht zurück. Ueber Beeinflussung der Reaktionen der doppelten Bindung durch benachbarte Gruppen vgl. Seite 200. Diamylen addiert z. B. zwar noch 2Br bei —17°, bei höherer Temperatur dagegen erfolgt HBr-Entwickelung, es findet also Substitution statt (B. 8, 434; 11, 991). Die Polymerisation mit konzentrierter

[1]) Durch Abspaltung mit PbO läßt sich daraus Tetramethyläthylen gewinnen.

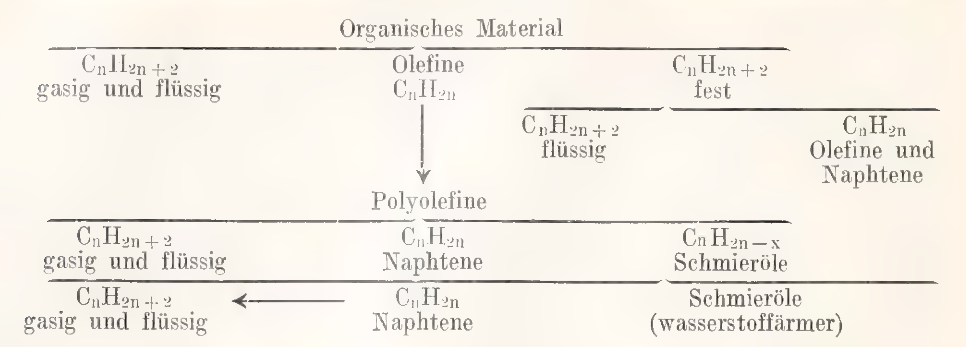
H_2SO_4 stellt man sich z. B. beim i-Butylen so vor, daß über intermediär entstehendes $(CH_3)_3C.SO_4H$ durch Reaktion mit einem zweiten i-Butylen $(CH_3)_3C-CH=C(CH_3)_2$ oder C_8H_{16} entsteht. Aethylen und die niedrigeren Glieder bis einschließlich C_3 sind nicht polymerisierbar. Von großer prinzipieller Wichtigkeit erscheint eine vereinzelte Beobachtung von Aschan (Ch. Z. 02, 726), durch die die Möglichkeit auch eines Uebergangs von Olefin in Cykloparaffin nachgewiesen wurde, eine Reaktion, die ein Analogon bilden würde zum Uebergang der Acetylene in aromatische Ringe durch Polymerisation.[1]) Aschan erhielt bei Kondensation von Amylen mit $AlCl_3$ bei gewöhnlicher Temperatur gesättigte Kohlenwasserstoffe, in denen er Naphtene oder Cykloparaffine nachweisen konnte.

Ueber Möglichkeit und Bedingungen der Depolymerisierung von Olefinen finden sich in der Literatur nur vereinzelte Angaben. Engler nimmt in Polyolefinen besonders labilen Wasserstoff an, vermöge dessen sie leicht in Paraffine und Naphtene und wasserstoffärmere sogenannte Schmieröle zerfallen (B. 43, 388). Bei Diolefinen ist die Depolymerisation leicht durchführbar durch bloßes Erhitzen z. B. die Reaktion Kautschuk $\leftrightarrows$ Isopren, deren Umkehrung erst in neuster Zeit gelungen ist und bei genügend leichter Beschaffbarkeit des Isoprens die künstliche Herstellung des Kautschuks in praxi ermöglichen wird. Derartige Beziehungen zwischen Olefinen, besonders den höheren Diolefinen und den in der Natur vorkommenden Terpenen (vgl. S. 193) sind in großer Zahl bekannt.

[1]) Die hier berührte Analogie in der Polymerisierbarkeit der Olefine zu zyklischen Gebilden der Paraffinreihe, der Acetylene zu solchen der Benzolreihe findet während des Druckes dieser Zeilen ihre Bestätigung durch Ipatiew (B. 44, 2978ff.). Seine Versuche betreffen die Veränderung von a) Aethylen und i-Butylen, b) Hexan, c) Cyklohexan bei hohen Temperaturen und Drucken mit und ohne Katalysatoren (z. B. Al_2O_3). Das sehr komplexe Reaktionsprodukt enthielt Gase (H_2; C_nH_{2n+2}; C_nH_{2n}), Flüssigkeiten von sehr weiten Siedegrenzen und sehr wenig feste Stoffe. Es bestand aus Anen (C_5 bis C_9), Enen (C_5 und C_6 oder deren Polymere), Cyklanen (Hauptprodukt der Reaktion, besonders in den hochsiedenden Anteilen), oberhalb 250° auch weiteren sehr H-armen Kohlenwasserstoffen, (wohl mit kondensierten Kernen). Aromatsiche Kohlenwasserstoffe waren nur bei c entstanden. Bei Hexan verlief die Zersetzung unter Druck im Gegensatz zu Cyklohexan so heftig, daß Explosion eintrat. Auch die gleichzeitig (B. 44, 3121 Zelinski) ausgeführte sehr glatte Spaltung von Cyklohexan in Benzol nud Wasserstoff (Katalysator Palladium, Temp. 200 bis 300°) sei hier der Vollständigkeit wegen erwähnt.

Die oben erwähnten Abspaltungen unter Bildung von Olefin machen dessen Auftreten bei unvollständiger Verbrennung und überhaupt bei zahlreichen pyrogenen Prozessen, sowohl in den Gasen, wie in den Teeren der Trockendestillationen (z. B. bei der Leuchtgasfabrikation) erklärlich. Die Fähigkeit der Olefine andererseits zu weiteren Kondensationen, Abspaltungen, Polymerisationen usw. macht es verständlich, daß bei Erhitzen von Paraffinkohlenwasserstoff unter geeigneten Bedingungen Umwandlung in Gemische aller möglichen Kohlenwasserstoffe eintreten kann. Aus höheren Paraffinen entstehen dabei niedere, gleichzeitig aber Olefine, Cyklane und schließlich auch aromatische Kohlenwasserstoffe, diese wohl aus intermediär entstehenden Acetylenen. Bei dem sogenannten Crackingprozeß wird diese sehr komplexe Reaktion ausgenützt, um aus den Petroleum-Rückständen, die nur als Schmieröl verwendbar sind, Brennöle zu erhalten, die höher im Werte stehen. Die Erhitzung findet in Gefäßen statt, deren aus Eisen bestehende heiße Wand möglicherweise als Katalysator bei der Reaktion beteiligt ist. Anfänglich war man der Ansicht, daß hierbei starke Ueberhitzung der Dämpfe nötig und wirksam sei, später hat sich gezeigt, daß sehr lange anhaltendes Sieden unter Wiederkondensation (also am Rückflußkühler) und langsame Steigerung der Temperatur zur Spaltung genügt und insofern vorteilhafter ist, als die bei höherer Temperatur stattfindende Abscheidung von Coke, und Verluste durch Verflüchtigung von Gasen vermieden werden. Der Beginn der Zersetzung erfolgt schon bei 200°; je höher die Temperatur, um so kleiner werden die Spaltstücke. Engler, der derartige Zersetzungen analytisch verfolgt hat, erhielt dabei 40% ungesättigte (bei höherer Temperatur mehr) und 60% gesättigte Produkte (C. 98 I, 191). Im leichten Crackingöl fand er alle Kohlenwasserstoffklassen an und zwar von C_6 bis C_{10}, von aromatischen Benzol, Toluol, Xylol, Mesitylen und ψ-Cumol. Der Verlauf der Reaktion ist dann auch an einheitlichem Material (Hexan bis Oktan) von ihm verfolgt worden (B. 30, 2908) und schließlich wurden die dabei gewonnenen Ansichten angewendet, um die vermutliche Bildung des Erdöls aufzuklären. Engler gibt die möglichen Umwandlungen bei pyrogener Reaktion durch das auf der folgenden Seite dargestellte Schema wieder.

Anhangsweise sei bemerkt, daß im ungesättigten System RCH = CHR die Wasserstoffe auch insofern reaktiv sind, als sie bei intakt bleibender Doppelbindung mit reaktivem OH oder Halogen, z. B. dem tertiärer Alkohole oder Halogenderivate, als Wasser oder Halogenwasserstoff austreten können (Kon-



densationsmittel $ZnCl_2$, H_2SO_4, PbO) z. B.

$$(CH_3)_2\,C{=}CH_2 + COH(CH_3)_3 \rightarrow (CH_3)_3\,C{-}CH{=}C(CH_3)_2$$

d. i. Bildung von i-Dibutylen aus i-Butylalkohol und i-Butylen (A. 189, 65). Auch die Entstehung von Isopren $CH_2{=}\underset{\displaystyle CH_3}{C}{-}CH{=}CH_2$ aus Butadien und Chloroform kann hier erwähnt werden.

Geringe Mengen Olefine werden im Harzöl gefunden, auch im kanadischen Petroleum; in der Cuticula der Gräser soll ein Olefin C_{27}, Ceroten genannt, beobachtet worden sein. Vielleicht gehört in diese Kohlenwasserstoffklasse auch der Farbstoff der gelben Rübe Caroten $C_{40}H_{56} = (C_5H_7)_8$ (Willstätter). Es ist auch sonst unter den gelben Pflanzenfarbstoffen verbreitet.

Aliphatische Kohlenwasserstoffe C_nH_{2n-2}. Der Formel C_nH_{2n} entsprechen, wie erwähnt, zweierlei im Verhalten ganz verschiedene Kohlenwasserstoffreihen, von deren Konstitution wir uns darum ein ganz verschiedenes, durch die Formel symbolisiertes Bild machten, für die eine Reihe das der doppelten Bindung, für die andere das des Ringschlusses. Ein jedes weitere Manko zweier Wasserstoffatome der gesättigten Formel der Paraffine gegenüber wird danach immer Ausdruck finden entweder in einer Doppelbindung oder in einem Ringschluß im Molekül. So können Kohlenwasserstoffe der Formel C_nH_{2n-2} enthalten

a) 2 Doppelbindungen: Diolefine oder Diëne

b) 2 Ringschlüsse: kondensierte Cyklane
c) 1 Ringschluß und 1 Doppelbindung: Cyklene
} werden an anderer Stelle besprochen.

Dazu kommt nun noch eine weitere Abart von Kohlenwasserstoffen, deren Reaktionen und Bildungsweisen nicht durch eines der Symbole a bis c plausibel gemacht werden können und in denen d) eine dreifache Bindung $C{\equiv}C$ angenommen wird. Nach ihrem niedrigsten Repräsentanten C_2H_2 oder $CH{\equiv}CH$ wird die Reihe als die der Acetylene benannt.

3 b) Diolefine. Verhalten und Darstellung. Kohlenwasserstoffe C_nH_{2n-2} sind allgemein gewinnbar aus di- (OH oder Halogen) substituierten Paraffinen durch Abspaltung von 2HOH oder 2HCl, oder aus tetrasubstituierten mit zwei Paaren benachbarter Substituenten (z. B. Butadien $CH_2{=}CH{-}CH{=}CH_2$ aus Erythrit $CH_2OH{-}CHOH{-}CHOH{-}CH_2OH$). Diolefine zeigen im allgemeinen additiv die Reaktionen zweier Doppelbindungen, d. h. sie addieren vier Atome Brom usw. Daneben kann sich ein Einfluß der einen Doppelbindung auf die andere geltend machen, der von der Lage beider zueinander abhängt. Er kann in einer Abschwächung des ungesättigten Charakters bestehen, wie bei den sogenannten konjugierten Doppelbindungen

$$RC{=}C{-}C{=}CR.$$

Von doppelt ungesättigten Isomeren ist diese Form die begünstigtste (A. 306, 121), weil sie einen Zustand größerer Sättigung oder geringerer freier Energie darstellt als z. B. ein System $C{=}C{-}C{-}C{=}C$. Die konjugierten Systeme haben geringere Verbrennungswärme als ihre Isomeren. In manchen Fällen werden von dem konjugierten System nur zwei Bromatome, diese allerdings mit Begierde addiert, während die zwei weiteren Bromatome erheblich schwerer einwirken. Es hat sich dabei herausgestellt, daß das konjugierte System als eine ungesättigte Einheit höheren Grades reagieren kann, indem es an den endständigen C-Atomen zunächst addiert, derart daß dabei die zwei ursprünglichen Doppelbindungen verschwinden, und eine mittlere anstatt ihrer entsteht. Von einer solchen „1,4 Addition", und zwar beobachtet am Butadien

$$CH_2{=}CH{-}CH{=}CH_2$$

geht die Thielesche Theorie der Partialvalenzen aus vgl. S. 186.

Eine Beeinflussung im entgegengesetzten Sinne, nämlich eine Steigerung der Reaktivität und des ungesättigten Charakters zeigen die sogenannten kumulierten oder Zwillingsdoppelbindungen $C{=}C{=}C$ (Typus des

Allens $CH_2=C=CH_2$). Die Kenntnis all dieser Verbindungen steht wieder weit zurück hinter der der Olefine und noch mehr der Paraffine, immerhin ist ihre Zahl in der letzten Zeit erheblich gewachsen. Sie haben neuerdings erhöhte Wichtigkeit bekommen, nachdem ihre Verwandtschaft mit in der Natur vorkommenden Substanzen erkannt worden ist. Hier sind besonders zu nennen die der Formel C_5H_8 entsprechenden Diëne, die durch mannigfache Reaktionen mit den Terpenen $C_{10}H_{16}$ des Pflanzenreichs verknüpft sind und darum Hemiterpene genannt werden. So sind zwei Moleküle Isopren C_5H_8 kondensabel zu Limonen $C_{10}H_{16}$ einem Körper von Zitronengeruch, der in vielen ätherischen Oelen enthalten ist

$$2\ CH_2=C(CH_3)-CH=CH_2 \rightarrow$$

Isopren oder 2-Methylbutadien

[Strukturformeln: zwei Moleküle Isopren → Limonen (Ring aus C(CH₃), CH, CH₂, CH₂, CH, CH₂ mit Seitenkette C(=CH₂)CH₃)]

Noch viel wichtiger, weil voraussichtlich von großer praktischer Bedeutung für die Zukunft, ist die Möglichkeit, eben dasselbe Isopren zu Kautschuk zu polymerisieren, in dem man nach **Harries** (Ann. 383, 175) ein Dimethylcyklooktadien zu erblicken hat

[Strukturformeln: zwei Moleküle Isopren → Dimethylcyklooktadien (Ring aus C(CH₃), CH₂, CH₂, CH, CH₂, CH₂, C(CH₃), CH)]

Uebrigens sind nach **Harries** (a. a. O.) auch andere isomere Butadiene, zu kautschukähnlichen Produkten polymerisierbar. Die Polymerisierung kann auf verschiedene Weisen (mit Eisessig, Natrium u. a.) am einfachsten durch lang anhaltendes Erhitzen bewirkt werden. Die bisher nicht überwundene Hauptschwierigkeit ist bei der Reaktion die Gewinnung des Isoprens aus wohlfeilen Rohprodukten auf möglichst einfache Weise. Isopren wurde schon vor langer Zeit in den Produkten der Trockendestillation des Parakautschuks — einer depolymerisierenden Umkehrung obiger Reaktion — aufgefunden, ebenso beim Leiten von Terpentinöldampf über glühende Platinspiralen oder durch glühendes Eisenrohr. Für die heutige Gewinnung kommt das p-Kresol (Pat. d. Elberfelder Farbwerke) und die Stärke (**Harries**) in Frage, aus denen es auf wenig einfache Weise gewonnen werden soll. Außer jenen Gewinnungsarten der Diolefine, die nur Kombinationen solcher bereits früher für die einfachen Olefine genannter darstellen, sei hier erwähnt die aus zyklischen Aminen durch Abbau nach **Hofmann-Ladenburg**. Auch diese Reaktion spielt bei dem Problem der Darstellung künstlichen Kautschuks eine Rolle. Man erhält nach dieser Methode z. B. Piperylen oder 1-Methylbutadien aus Piperidin auf einem Wege, bestehend in abwechselnder Methylierung und Spaltung durch KOH, mit folgender Destillation; die Zwischenstufen sind gekennzeichnet durch folgende Formeln:

[Strukturformeln: Piperidin (NH) → N(CH₃)₂J → N(CH₃)₂OH → N(CH₃) + HOH → N(CH₃)₃J → N(CH₃)₃OH → N(CH₃)₃ + HOH, Piperylen]

Ebenso gelangt man vom Pyrrolidin (Ring mit NH) zum Butadiën oder vom β-Methylpyrrolidin zum Isopren.

Diolefine entstehen auch häufig bei pyrogenen Zersetzungen von Derivaten der Paraffine und Olefine; so entsteht Butadien beim Leiten von Amylalkoholdampf durch ein glühendes Eisenrohr und findet sich auch im Leuchtgase. Synonyme für Butadien sind Divinyl, Crotonylen, Butin, Erythren, Pyrrolylen. Der Kohlenwasserstoff siedet schon bei -4^0 unter 713 mm Druck.

Von höheren Kohlenwasserstoffen dieser Reihe verdienen Erwähnung Geraniolen C_9H_{16} und Linaloolen $C_{10}H_{18}$, deren Alkohole in ätherischen Oelen vieler Pflanzen anzutreffen sind, und die in engster Beziehung zu den Terpenen stehend als aliphatische Terpene bezeichnet werden können. Beide enthalten sogenannte isolierte Doppelbindungen, d. h. zwischen denselben liegt eine Anzahl von CH_2-Gruppen. Durch die Möglichkeit des Wechsels in der Lage der Doppelbindung

ist die Zahl möglicher Isomerien namentlich bei den höheren Gliedern sehr erheblich. Sie beträgt z. B. allein für den normalen Kohlenwasserstoff C_6H_{10} schon 7 Isomere, gegen 3 bei C_6H_{12} mit normaler Kette. Dem Nachweis der verschiedenen Konstitutionsarten dienen genau wie bei den einfachen Olefinen wieder die paraffinen Verbindungen, von denen ausgehend man die Kohlenwasserstoffe C_nH_{2n-2} darstellt, und zu denen man bei der Addition oder bei der Sprengung der Doppelbindung (z. B. durch Oxydation) gelangt. Daß man dabei Täuschungen ausgesetzt sein kann infolge von Verschiebungen der doppelten Bindung, sei auch hier wiederholt.

Von Kohlenwasserstoffen mit Zwillingsdoppelbindung sei das gasförmige (schon bei —32° siedende) Allen (Propadien, Dimethylenmethan) $CH_2=C=CH_2$ erwähnt, das durch Abspaltung von Halogenwasserstoff mit Kali, oder von Halogen mit Zinkstaub aus geeigneten Halogenverbindungen gewonnen wird. Durch Anlagerung von Wasser geht es in Aceton, mit Na erhitzt in die Acetylenverbindung dieses Metalles über. Die Kenntnis derartiger Verbindungen ist sehr beschränkt.

Ein allgemein gangbarer Weg, zu immer ungesättigteren Kohlenwasserstoffen zu gelangen, ist der abwechselnder Bromierung und Wiederabspaltung von HBr. Das aus dem Monobromderivat durch HBr-Entziehung mit alkoholischem Kali gewinnbare Aethylen gibt bei Br-Addition ein Dibromid, dem man wieder 2 HBr entziehen kann nach dem Schema

$$C_nH_{2n+2} \rightarrow C_nH_{2n+1}Br \rightarrow C_nH_{2n} \rightarrow C_nH_{2n}Br_2 \rightarrow C_nH_{2n-2} \text{ usw.}$$

3c) Acetylene. Verhalten und Darstellung. Nach denselben Prinzipien wie bei den Olefinen ergibt sich die Formel der Acetylene in eindeutiger Weise aus Synthesen und Zersetzungen, wenn man dem einfachsten, Acetylen schlechthin genannten Kohlenwasserstoff der Reihe von der Bruttoformel C_2H_2 die Konstitution $CH{\equiv}CH$ zuerteilt. Die Bevorzugung dieser Formel gegenüber anderen mit freien Valenzen u. a. stützt sich auf genau dieselben Gründe, die bei dem Kapitel Olefine erörtert wurden. Was das chemische Verhalten betrifft, so zeigen sie den ungesättigten Charakter eines C-Atompaares in doppeltem Maße wie die Olefine, addieren also 4 Atome Wasserstoff oder Brom oder 2 Moleküle HBr. Die ersten beiden Br werden dabei schwerer aufgenommen als die anderen; von Jod werden überhaupt nicht mehr als zwei Atome addiert. Von HCl wird dagegen das erste leichter als das zweite addiert. Die Addition könnte bei Ungleichheit der Substituenten natürlich zu zwei Produkten führen $CHX_2—CHY_2$ oder $CHXY—CHXY$. In der Tat ist die Bildung des ersten, des Aethylidenderivats bevorzugt; so führt die Addition von Wasser bei Gegenwart geeigneter Katalysatoren zu Aldehyd und Keton

$$CH{\equiv}CH \rightarrow CH_3—CHO$$
$$CH_3C{\equiv}CH \rightarrow CH_3—CO—CH_3$$

Individuelle Reaktionen der Acetylene. 1. Bildung von unlöslichen explosiven Cu- und Ag-Verbindungen beim Einleiten des Gases in ammoniakalische Kupfer- oder Silberlösung, jedoch nur bei Kohlenwasserstoffen, die die reaktive $CH{\equiv}$Gruppe enthalten, also außer Acetylen selbst bei monosubstituierten Homologen, nicht aber bei solchen vom Typus $RC{\equiv}CR$. Durch Salzsäure lassen sich die Kohlenwasserstoffe aus jenen Verbindungen wieder in Freiheit setzen. Acetylennatrium ist gewinnbar durch Erhitzen von Na-Metall in Acetylengas. 2. Polymerisierbarkeit zu aromatischen Kohlenwasserstoffen $3C_2H_2 \rightarrow C_6H_6$ (Benzol)

$3CH_3C{\equiv}CH \rightarrow$ Mesitylen

die erstgenannte Reaktion ist umkehrbar. — Chromsäure oxydiert Acetylen zu Essigsäure, $KMnO_4$ zu Oxalsäure.

Bildungsweisen. In pyrogenen Reaktionen bildet sich Acetylen, genau wie dies für Aethylen erwähnt wurde (Vorkommen im Leuchtgas). Acetylene entstehen aus zweiwertigen Halogenverbindungen der Paraffine nach demselben Prinzip wie Olefine aus den Monoderivaten, und zwar s- aus den Halogen-Additionsprodukten der Olefine, und as- aus den chlorierten Aldehyden und Ketonen durch Entziehung von zwei Molekülen Halogenwasserstoff. Die Abspaltung verläuft dabei erfahrungsgemäß immer in dem Sinne, daß eine dreifache und nicht zwei doppelte Bindungen entstehen

$$CH_2Br — CH_2Br \rightarrow CH{\equiv}CH + 2HBr;$$
$$CH_3CCl_2CH_3 \rightarrow CH_3C{\equiv}CH + 2HCl.$$

Unter dem Einfluß alkoholischer Lauge kann die Reaktion der Abspaltung auch stufenweise vollzogen werden. Natürlich können auch direkt olefinische Monohalogenverbindungen verwandt werden.[1])

Individuelle Bildungsweisen: 1.) Aus Calciumkarbid mit Wasser; 2.) bei unvollständiger Verbrennung des Leuchtgases (im zurückgeschlagenen Bunsenbrenner); 3.) aus C und H im elektrischen Flammenbogen zwischen Kohleelektroden in Wasserstoff-Atmosphäre; 4) bei Elektrolyse ungesättigter

[1]) Merkwürdig ist eine bisweilen dabei stattfindende Verschiebung der Bindung, wobei immer statt des asymmetrischen (as-) das symmetrische (s-) Acetylen gebildet wird so z. B. statt $C_2H_5.C{\equiv}CH \rightarrow CH_3C{\equiv}CCH_3$.

Dicarbonsäuren z. B. Fumar- und Maleinsäure COOH CH=CH COOH.

Nomenklatur. Nach den Genfer Regeln wird der Name aus dem des Paraffins gebildet, indem man die Endung an durch in ersetzt: $CH_3 CH_2 C \equiv CH$ 3 Butin. Nach alter Art bezeichnet man alle als Substitutionsprodukte des Acetylens z. B.

$$CH_3 C \equiv C CH_3$$

Dimethylacetylen. Daneben existieren besondere nicht systematisch gebildete Namen z. B. für den letztgenannten Kohlenwasserstoff Crotonylen, für $CH_3 C \equiv CH$ Allylen; Valerylen = 2 Pentin usw. Auch vom Namen der Säuren hat man Bezeichnungen abgeleitet durch Anhängen der Silbe -iden: $C_6H_{13}C \equiv CH$ Capryliden.

Acetylen ist ein farbloses, unangenehm riechendes, giftiges Gas, etwas löslich in Wasser, ebenso in Aceton. Brennt mit stark leuchtender Flamme, außer in besonders konstruierten Brennern (mit sehr feiner Oeffnung) stark rußend. Endotherme Verbindung, mit Luft gemischt explosiv. Verwendung zur Beleuchtung, auch zur Rußfabrikation.

Die Acetylene C_4 bis C_{16} sind flüssig, äußerlich von Paraffinen und Olefinen nicht unterschieden; auch die physikalischen Konstanten liegen nahe bei denen der anderen. Sie sind etwas schwerer als jene. Ein lauchartiger Geruch ist für alle charakteristisch.

3 d) Kohlenwasserstoffe C_nH_{2n-4}; C_nH_{2n-6} usw. Die Möglichkeiten der Formulierung für diese noch wasserstoffärmeren Kohlenwasserstoffe (Zahl der doppelten oder dreifachen Bindungen eventuell der Ringschlüsse) ergeben sich nach dem Obigen von selbst. Die Vieldeutigkeit nimmt mit der Wasserstoffarmut zu. Theoretisches Interesse verdient ein Hexatrien C_6H_8 oder

$$CH_2=CH-CH=CH-CH=CH_2$$

eine bei 79° siedende Flüssigkeit vom spez. Gew. 0,74, die Brom zunächst an der mittleren Doppelbindung aufnimmt (!). Vgl. Benzol C_6H_6 Sdp. 80,4° spez. Gew. 0,87; Cyklohexan C_6H_{12} Sdp. 81°; spez. Gew. 0,79. Eine gewisse Wichtigkeit besitzen Kohlenwasserstoffe dieser Reihe mit 10 C-Atomen, die den Terpenen isomer sind. Ein solches „offenes oder aliphatisches Terpen" $C_{10}H_{16}$ ist das z. B. auch im Hopfen gefundene Myrcen, in dem wegen seines optischen Verhaltens drei Doppelbindungen und kein Ringschluß angenommen werden. Theoretisches Interesse beanspruchen auch die „höheren" Acetylene Butadiin (= Diacetylen) $CH \equiv C-C \equiv CH$ und dessen drei, dem Benzol C_6H_6 isomere Derivate die Hexadiine 2,4; 1,4 und 1,5 z. B. $CH_3 C \equiv C-C \equiv C-CH_3$ Hexadiin 2,4 oder Dimethyldiacetylen.

Auch in manchen Petrolsorten finden sich Kohlenwasserstoffe der Reihen C_nH_{2n-4} bis C_nH_{2n-8}, ja solche mit noch weit weniger Wasserstoff. Wir finden für sie Formeln angegeben wie $C_{32}H_{22}$, $C_{24}H_8$, ja sogar $C_{14}H_2$. Jedoch ist sicheres über Konstitution usw. derselben nicht bekannt. Wahrscheinlich werden sie erst beim Destillationsprozeß gebildet.

Zu nennen sind schließlich dann noch Kohlenwasserstoffe, die zwar nicht als solche, aber in Form von Derivaten im Pflanzenkörper auftreten und darum Interesse beanspruchen, so vor allem die von Willstätter bei seinen Forschungen über Chlorophyll isolierten Kohlenwasserstoffe Phytan $C_{20}H_{42}$, Phyten $C_{20}H_{40}$ und Phytadien $C_{20}H_{38}$. Willstätter formuliert das erstgenannte als

$$CH_3\left(-\underset{\underset{CH_3}{|}}{CH}-\right)_3 CH_3$$

Alle drei sind farblose, leicht bewegliche Flüssigkeiten. Es könnten dann weiter genannt werden die Kohlenwasserstoffe, die Muttersubstanzen der zahlreichen Terpenalkohole, Aldehyde und Ketone sind (Geraniol, Linalool, Citral, Methylheptenon usw.).

Einzelne Glieder aliphatischer Kohlenwasserstoffe. Eine Aufzählung der einzelnen Glieder bietet insofern weniger Interesse, als, wie erwähnt, die Aenderung der Eigenschaften in den einzelnen Reihen nahezu kontinuierlich stattfindet und nur die niederen Glieder, wo noch mehr Sprunghaftigkeit herrscht, Einzelerwähnung verdienen, wenn dieser Abschnitt nicht hinauslaufen soll auf eine Aufzählung von Siedepunkten und anderen physikalischen Konstanten. Außer bei den niederen Gliedern finden sich qualitativ merkliche Verschiedenheiten nur bei Isomeren verschiedener Konstitution, und natürlich bei den Gliedern von Reihen verschiedenen Wasserstoffgehalts. Erwähnung verdienen weiterhin in der Natur — als solche, oder in einfachen Derivaten — vorkommende, technisch oder wissenschaftlich bemerkenswerte Kohlenwasserstoffe, soweit nicht das Nötige schon angegeben worden ist.

Methan CH_4. Farbloses, mit fast farbloser Flamme brennendes Gas, fast ohne Geruch (vgl. S. 178) in flüssiger Luft zu glasartiger Masse oder farblosen Nadeln erstarrend. Verbrennungswärme pro Mol. 214 Cal., Bildungswärme 21,5 Cal. Bei niederen Temperaturen bildet es ebenso wie die nächst höheren Homologen mit Wasser ein Hydrat. — An vielen Stellen der Erdoberfläche entweicht es, wird z. B. von sehr vielen Quellen mit heraufgebracht, besonders von den Petrolquellen, die es immer gelöst enthalten. Was im Erdinnern sein Entstehen bewirkt, ist nicht in jedem Fall bekannt. Seine Bildung

aus organischer Materie (speziell Cellulose) durch Zersetzung unter Einfluß von Mikroorganismen, macht sein Auftreten als Sumpfgas, wie in den Kohlenbergwerken (mit Luft gemischt: schlagende Wetter) und in den Darm-, Blut- und Atemgasen der Pflanzenfresser erklärlich. Die sogenannten heiligen Feuer von Baku am kaspischen Meer, seit unvordenklichen Zeiten brennend, werden von Methan gespeist. Große Ansammlungen von Methan bewirken das Entstehen sogenannter Schlammvulkane. Das „Knistersalz" von Wieliczka enthält Methan in Kristallhohlräumen eingeschlossen. Methan entsteht bei zahlreichen Trockendestillationen organischer Substanzen und findet sich so als „pyrogenes" Produkt im Leuchtgas (bis 40%). Für seine praktische Darstellung kommt in Betracht das Erhitzen von Salzen der Methancarbon- oder Essigsäure mit Aetzbasen (essigsaures Na + Natronkalk); eine langsame gleichmäßige Entwickelung erhält man auch bei Reduktion von CH_3J in Alkohol mit verkupfertem Zink, eine auch für die nächst höheren Homologen anwendbare Methode. Auch die Zersetzung des nach Grignard erhaltenen Methylmagnesiumjodides durch Wasser, in Methan und basisches Magnesiumjodid kann zur Darstellung benutzt werden. Weitere Bildungsweisen von Interesse sind folgende:

Leiten von H_2S und CS_2 über glühendes Kupfer;

Zersetzung von Aluminiumkarbid mit Wasser $Al_4C_3 + 12HOH \rightarrow 3CH_4 + 4Al(OH)_3$;

Bildung aus den Elementen (einziger direkt so gewinnbarer Kohlenwasserstoff), bei 1200°; ferner indirekt durch Reduktion des im elektrischen Flammenbogen aus den Elementen entstehenden Acetylens. Dabei entsteht Aethan, welches weiter in Methan, Kohlenstoff und Wasserstoff zerfällt.

Entstehung durch mannigfache Reduktionsreaktionen z. B. aus CO und CO_2 mit Wasserstoff nach Senderens (Gegenwart von Ni), aus Chloroform oder Tetrachlorkohlenstoff mit Na-Amalgam und Wasser.

Methan ist von allen Paraffinen am beständigsten und am schwersten angreifbar. Von anderen Kohlenwasserstoffen kommt ihm bei hohen Temperaturen darin nur Acetylen gleich. Im Gemisch mit Luft wird Methan in Gegensatz zu anderen Kohlenwasserstoffen und zu Wasserstoff, bei Gegenwart von Palladium bei 450° praktisch nicht verbrannt. Von kalter rauchender Schwefelsäure wird es deutlich gelöst, aber sehr langsam (Verwertung beider Reaktionen in der Gasanalyse).

Aethan. Vorkommen in der Natur als Hauptbestandteil der den Petroleumquellen in Pittsburg in Amerika entweichenden Gase. Außer nach den allgemeinen Bildungsweisen erhältlich aus Essigsäureanhydrid mit BaO_2, wobei C_2H_6, Ba-acetat und CO_2 entstehen soll. Löslicher in Wasser und Alkohol als Methan, auch leichter oxydierbar Sdp. —90°.

Propan. In den in Petroleum gelösten Gasen. Leicht erhältlich aus Glyzerin mit Jodwasserstoff. 1 Vol. Alkohol löst 6 Vol. Propan. Sdp. —37°.

n-Butan Sdp. 1°. 1 Vol. Alkohol löst 18 Vol.

Die wenig über 0° siedenden Petroldestillate fanden als Rhigolen oder Cymogen zur Eisbereitung oder als Anästhetikum Verwendung.

Olefine. CH_2 Methylen nicht darstellbar. C_2H_4 bis C_4H_8 sind Gase.

Aethylen (Aethen, Elayl) schwach süßlich riechendes Gas. Sdp. etwa —100°, brennt mit leuchtender Flamme, zerfällt dabei zuerst in $CH_4 + C$. Darstellung aus Alkohol mit konzentrierter H_2SO_4 oder besser Phosphorsäure unter Zusatz von Sand, um das Schäumen zu hindern. Pyrogene Entstehung bei vielen Trockendestillationen, daher in Leuchtgas (bis 5%). Oberhalb 350° zerfällt es in Methan + Acetylen; bei höherer Erhitzung zerfällt Methan in Acetylen und Wasserstoff, schließlich auch Acetylen in Kohlenstoff (Ruß) und Wasserstoff. Von rauchender H_2SO_4 stark absorbiert (Gasanalyse), von kalter konzentrierter H_2SO_4 nur sehr langsam absorbiert, heiß viel schneller. Bei 60 Atmosphären Druck und 10° leicht zu verflüssigen; früher zur Erzielung niedriger Temperaturen benützt, wie heute flüssige Luft.

Propylen. Durch Destillation von Glyzerin mit viel Zinkstaub. 1 Vol. Alkohol löst 12 Vol. Propylen, gegenüber 6 Vol. Propan.

Von den Amylenen ist das Trimethyläthylen leicht zugänglich als Hauptprodukt bei Behandlung des Fuselöls mit $ZnCl_2$ („Rohamylen" aus Fuselöl). Früher als Anästhetikum gebraucht unter dem Namen Pental. Rohmaterial für Darstellung des offizinellen Amylenhydrats. Sehr leicht polymerisierbar (durch Schwefelsäure 1:1) zu obstartig riechenden Diamylen.

Von Hexylenen ist Tetramethyläthylen

$$\begin{matrix} CH_3 & & & & CH_3 \\ & \searrow & & \swarrow & \\ & & C=C & & \\ & \nearrow & & \nwarrow & \\ CH_3 & & & & CH_3 \end{matrix}$$

leicht vom Pinakon aus zugänglich.

Die Darstellung höherer Olefine kompliziert sich durch Eintreten von Umlagerungen aller Art. Neben Wanderungen der Doppelbindungen können auch Isomerisierungen des C-Skeletts stattfinden wie

$$\begin{matrix} C \\ C \end{matrix}\!\!>C-C=C \rightarrow \begin{matrix} C \\ C-C \end{matrix}\!\!>C=C.$$

Derartige Vorgänge, deren Erklärung mit Hilfe der üblichen Strukturlehre gewissen Schwierigkeiten begegnet, bilden hier gerade-

zu die Regel. Meist sucht man sie durch die Annahme abwechselnd stattfindender Abspaltung und Anlagerung im anderen Sinne zu erklären. Scheinbar am meisten begünstigt hinsichtlich der Bildung sind die symmetrischen Formen wie $CH_3CH{=}CHCH_3$.

Acetylene. Acetylen C_2H_2. Darstellung aus Calciumkarbid CaC_2 mit Wasser; CaC_2 entsteht durch Glühen von Kohle mit Kalk im elektrischen Ofen. Giftiges Gas von üblem Geruch, der am „zurückgeschlagenen" Bunsenbrenner konstatierbar ist. Der Geruch des Produktes aus CaC_2 entstammt größeren Teils Verunreinigungen.

Brennt mit blendend weißer Flamme; nur in besonders konstruierten Brennern (mit sehr enger Oeffnung, also relativ starkem Luftzutritt) ohne Rußabscheidung.

Bildet sich als einziger Kohlenwasserstoff direkt aus den Elementen im elektrischen Flammenbogen. Produkt unvollständiger Verbrennung von allen möglichen Alkoholen, Aethern usw. Im Leuchtgase enthalten (0,06 %).

Bei 18° wird 1 Vol. Acetylen gelöst durch 1 Vol. Wasser, durch $^1/_6$ Vol. Alkohol oder Eisessig. Beim Einleiten in die ammoniakalischen Lösungen von Kupfer- und Silbersalzen entstehen Acetylenkupfer C_2HCu_2OH als gelber oder roter, Acetylensilber als weißer Niederschlag. Beide explosiv durch Schlag und beim Erhitzen. Salzsäure setzt den Kohlenwasserstoff daraus wieder in Freiheit (Methode der Reinigung), Silbernitrat wird auch in wässeriger Lösung gefällt: $C_2HAg \cdot AgNO_3$.

Die Fähigkeit zur Bildung solcher Metallverbindungen ist nur vorhanden bei Acetylen und seinen monosubstituierten Derivaten, sie verschwindet daher nach dem Erhitzen mit alkoholischem Kali, weil dadurch eine Umlagerung unter Wanderung der dreifachen Bindung stattfindet. Die umgekehrte Umlagerung kann Erhitzen mit metallischem Natrium bewirken. Es existieren die beiden Verbindungen C_2HNa und C_2Na_2. In Form der Kupferverbindung sind noch Zentimilligramme Acetylen nachweisbar.

Die Acetylene, besonders das sehr wohlfeile einfache Acetylen aus Karbid, reizen bei ihrer großen Reaktivität zur Benutzung als Ausgangsmaterial für Synthesen im großen. In der Tat werden auch z. B. die höher chlorierten Aethane heute so dargestellt und finden als vorzügliche Solventien bei völlig mangelnder Feuergefährlichkeit statt der Benzine schon viel Verwendung. Ein anderes lohnendes Problem dagegen die Ueberführung in Alkohol, hat trotz ihrer Ausführbarkeit im Laboratorium gemäß den Gleichungen

$C_2H_2 + H \rightarrow C_2H_4$; $C_2H_4 + H_2O \rightarrow$ Alkohol über Aetherschwefelsäure oder Aldehyd

eine technische Lösung bis jetzt nicht gefunden. Bei Gegenwart von Quecksilbersalz und Wasser ist Acetylen überführbar in Aldehyd.

Die höheren Acetylene sind ohne jedwede Bedeutung.

Halogenverbindungen.

Bildungsweisen 1. aus freiem Halogen und Kohlenwasserstoff durch Substitution,

2. durch Addition von Halogenwasserstoff an ungesättigten Kohlenwasserstoff,

3. aus Alkoholen mit Halogenwasserstoff $ROH + HCl \rightarrow RCl + HOH$.

4. aus Aminen mit Halogenwasserstoff d. h. durch Zersetzung der halogenwasserstoffsauren Salze der Amine,

5. aus Sauerstoffverbindungen mit Phosphorhalogenverbindungen,

6. durch Addition von freiem Halogen an ungesättigten Kohlenwasserstoff.

ad 1 und 2 vgl. die Bemerkungen auf S. 179 und 188.

ad 3. Als Esterbildung verläuft die Reaktion nur bis zu einem, von den äußeren Bedingungen der Reaktion und den angewandten Mengen abhängigen Gleichgewicht; man setzt daher wasserbindende Mittel ($ZnCl_2$; H_2SO_4) zu.

ad 4. In verschieden hohen Temperaturen zersetzen sich die Salze der Amine entsprechend den Gleichungen

$$\left.\begin{array}{lll} R_4NCl & \rightarrow & RCl + R_3N \\ R_3NHCl & \rightarrow & RCl + R_2NH \\ R_2NH_2Cl & \rightarrow & RCl + RNH_2 \\ RNH_3Cl & \rightarrow & RCl + NH_3 \end{array}\right\}$$

Umkehrung des Bildungsprozesses der Amine (Hofmann J. 1860, 343)

Technische Darstellung von CH_3Cl durch Destillation der Trimethylamin-haltigen Zuckerschlempe und Erhitzen mit HCl.

ad 5. Bei Verwendung von Aldehyden und Ketonen entstehen die entsprechenden Dichloride: $RC{\genfrac{}{}{0pt}{}{H}{O}} \rightarrow RC{\genfrac{}{}{0pt}{}{H}{Cl_2}}$. Aus Säuren entstehen deren Chloride $RCOOH \rightarrow RCOCl$.

ad 6. Hierbei entstehen naturgemäß mehrwertige Verbindungen, die an benachbarten C-Atomen halogenisiert sind.

Mehrwertige Verbindungen können auch entstehen nach 1 (vgl. S. 179), nach 2 bei doppelt ungesättigten Kohlenwasserstoffen, bei 3 aus mehrwertigen Alkoholen. Hoch halogenisierte Produkte werden durch abwechselnde Abspaltung von Halogenwasserstoff und Addition von freiem Halogen gewonnen:

$$RCH_2\text{-}CH_3 \rightarrow RCH_2\text{-}CH_2X \rightarrow RCH{=}CH_2 \rightarrow RCHX\text{-}CH_2X \rightarrow RCX{=}CH_2 \rightarrow RCX_2\text{-}CH_2X \rightarrow RCX{=}CHX \rightarrow RCX_2\text{-}CHX_2$$

usw.

Im wesentlichen nach den gleichen Methoden wie bei Paraffinen entstehen auch die Halogenderivate der anderen Kohlenwasserstoffe. Bei Olefinen wird naturgemäß eine Substi-

tuierung nach 1 wegen der sofortigen Addition (6) nicht möglich sein. Ungesättigte Halogenverbindungen sind aber erhältlich a) aus olefinischen Sauerstoffverbindungen nach 3 und 5, oder b) aus den Kohlenwasserstoffen einer noch H-ärmeren Reihe durch gemäßigte Addition nach 2 oder 6, oder c) aus den halogenreicheren Derivaten der gesättigten Reihe durch nur teilweise Abspaltung. Bisweilen unterliegen die zunächst entstehenden gesättigten Halogenverbindungen mehr oder weniger leicht gleich wieder Abspaltungen, so wenn beim Behandeln von Glycerin mit J und Phosphor Allyljodid $CH_2J - CH{=}CH_2$ entsteht. Der Additionsvorgang mit nachfolgender Abspaltung kann dadurch das Aussehen einer Substitution gewinnen:

$$RCH{=}CHR \rightarrow RCHCl{-}CHClR \rightarrow RCCl{=}CHR$$

(vgl. die analoge Kernsubstitution durch Halogen in der aromatischen Reihe). Nach a entstehen „sogenannte" ungesättigte Halogenverbindungen, die halogenisiert sind an einem bei der Doppelbindung nicht beteiligten C-Atom. Nach b entstehen Verbindungen mit direkt an ungesättigtem C gebundenem Halogen. Beide Arten zeigen deutliche Unterschiede. Manche a-Verbindungen zeigen scharfen, z. B. senfartigen Geruch, manche b-Verbindungen riechen angenehm. Vorwiegend letztere sind polymerisierbar. Gegenüber dem normalen Verhalten der Klasse a, die additiv die Reaktionen des Halogens und der Doppelbindung zeigt, findet man bei b eine stark geminderte Reaktionsfähigkeit des Halogens. Doppelten Austausches ist es so gut wie unfähig; mit KOH bildet es keinen Alkohol, mit HOC_2H_5 keinen Aether.[1])

Dasselbe Verhalten zeigen die aromatischen Halogenverbindungen, die nach der Kékuléschen Formel die Gruppe =CX enthalten. In der Seitenkette halogenisierte aromatische Verbindungen dagegen zeigen das typische Verhalten der Klasse a; auch inbezug auf den Geruch. Bei Einwirkung von freiem Halogen auf aromatische Substanzen mit aliphatischer Seitenkette wird im Licht und in der Wärme die letztere substituiert, in der Kälte und im Dunkel tritt Halogen in den Kern. Außerdem wird jeder Vorgang durch spezifisch wirkende Halogenüberträger begünstigt. Halogensubstitutionsprodukte der Acetylene nach b, ebenfalls viel leichter polymerisierbar als die Acetylene selbst, zeigen starke Tendenz zur Zersetzung unter C-Abscheidung: $CBr{\equiv}CH$ ist selbst entzündlich, $CCl{\equiv}CH$ selbst bei größter Vorsicht leicht heftig explodierend.

Physikalische und chemische Eigenschaften. Die ersten Halogenatome treten am leichtesten ein, die weiteren immer schwerer, unterstützt durch Katalysatoren (Halogenüberträger: Jod, Eisen, $SbCl_5$; bei Einführung von Jod HgO, HJO_3 um austretenden J zu binden). Die Schwierigkeit der Einführung steigt mit wachsendem Molekulargewicht des Kohlenwasserstoffs. Zersplitterung hochhalogenisierter C-Ketten (vgl. S. 180).

Chlor vermag Brom, letzteres wieder Jod aus den Verbindungen zu verdrängen. Bromide und Jodide sind auch durch $HgCl_2$ in Chloride überführbar; umgekehrt werden die Chloride zersetzt durch Jodid und Bromid von Aluminium oder Calcium. Alle Jodide werden im Licht unter Jodabscheidung allmählich zersetzt. Die reinen Halogenverbindungen sind meist farblos. Die stark halogenhaltigen und hochmolekularen Verbindungen sind fest, die niedersten Gase. Für die Siedepunkte gelten ungefähr die gleichen Regelmäßigkeiten wie bei Kohlenwasserstoffen (vgl. S. 178). Die der Jodverbindungen liegen am höchsten, die der Fluorverbindungen am niedrigsten. Alle Halogenderivate sieden niedriger als die entsprechenden Sauerstoffderivate. Die spezifischen Gewichte der F-, Cl-, Br-, J-Derivate eines und desselben Kohlenwasserstoffs stehen ganz ungefähr im Verhältnis des der freien Elemente. Das der niedersten ist bemerkenswert hoch (C_2H_5Cl 0,9; CH_3Br 1,7; C_2H_5J 2,0; CH_2J_2 2,5; $CHCl_3$ 1,5 alles in abgerundeten Zahlen) mit dem Molekulargewicht des Kohlenwasserstoffs sinkend, wird es allmählich kleiner als das des Wassers. Der Einfluß des Halogens auf das Ganze des Moleküls tritt mit steigendem Molekulargewicht zurück. Alle sind unlöslich in Wasser, löslich dagegen in den gebräuchlichen organischen Lösungsmitteln. Die niedersten wasserstoffreichen brennen mit schwach grüner Flamme, haben süßlich ätherischen Geruch und finden als Betäubungsmittel oder Anästhetika Verwendung; C_2Cl_6 riecht kampferartig. Ihrem chemischen Charakter nach zeigen sie verhältnismäßig große Reaktivität und tauschen das Halogen mit oft großer Leichtigkeit aus, besonders die Jodide. Den anorganischen Halogensalzen gegenüber ist dagegen ihre Reaktivität gering, sie geben nicht wie diese mit Silbersalz Niederschläge, weil das Halogen nicht ionisierbar ist. Eine Reaktion erfolgt um so schneller, je weniger Halogen in der Verbindung, und je mehr die Halogenatome verteilt sind. Von wesentlichem Einfluß ist die Art der an das Halogen gebundenen Gruppe; nach Michael (A. 1911) werden tertiäre Bromide schon durch Wasser in

[1]) Eine eintretende Reaktion führt unter Halogenwasserstoffabspaltung zum ungesättigten Kohlenwasserstoff der nächst niederen Reihe

$$RCH{=}CXR \rightarrow RC{\equiv}CR$$

Alkohol + HBr zerlegt (durch Schütteln mit Wasser bei gewöhnlicher Temperatur nach 10 Minuten quantitativ), sekundäre nicht durch Wasser, aber durch Schütteln mit $AgNO_3$-Lösung (drei Stunden) zersetzt, primäre weder durch Wasser, noch (kaum) durch Silbersalz zersetzt. Mit Silbernitrat tritt sonst meist erst bei längerer Einwirkung und beim Erhitzen im Einschlußrohr Reaktion ein. Nur Jodid und Bromid des Methyls und Aethyls geben mit alkoholischer Silbernitratlösung direkt einen Niederschlag, die Jodide schon in der Kälte, wie ein anorganisches ionisierbares Jodid, die anderen in der Hitze.

Der festen Bindung des Halogens entspricht, daß auch die Fluoride Glas nicht angreifen. Sehr merkwürdig sind gewisse bei erhöhter Temperatur erfolgende Umlagerungen der Halogenalkyle in Isomere z. B.

$CH_2Br—CH<^{CH_3}_{CH_3}$ i-Butylbromid in

$CH_3CBr<^{CH_3}_{CH_3}$, tertiär-Butylbromid, die man durch Annahme einer Abspaltung von HBr und Anlagerung in anderem Sinne zu erklären pflegt. Vgl. dazu Michael, A. 379, 263.

Die Klasse der Halogenderivate aliphatischer Kohlenwasserstoffe ist die Brücke, über die der Weg führt zur Gewinnung nahezu aller anderen wichtigen aliphatischen Verbindungen. Man betritt indessen diese Brücke aus oben erörterten Gründen — schwere Isolierbarkeit reiner Einzelglieder der Kohlenwasserstoffe und Nichteinheitlichkeit ihrer Halogenisierungsprodukte — meist nicht von der Seite der Kohlenwasserstoffe, sondern von der der Alkohole (vgl. S. 179). Trotz ihres massenhaften Vorkommens in den Erdölen sind die Kohlenwasserstoffe in präparativer Hinsicht wenig von Bedeutung, an Bildsamkeit stehen sie weit hinter den Kohlenwasserstoffen der aromatischen Reihe zurück. In Kürze seien hier einige der wichtigsten Körperklassen aufgeführt, die aus den Halogenverbindungen gewonnen werden können, und deren weitere nächste wichtige Derivate.

1. Alkohole durch Behandlung der Halogenalkyle als Ester der Halogenwasserstoffsäuren mit verseifenden Mitteln

$$RCl + KOH \rightarrow ROH + KCl$$

Oxydierbarkeit der primären Alkohole zu Aldehyden $RC<^{H}_{O}$ und Säuren RCOOH; der sekundären zu Ketonen R—CO—R. Bildung von Aethern (aus Alkohol mit konzentrierter Schwefelsäure) R—O—R.

2. Amine gemäß der Formel $RCl + HNH_2 \rightarrow RNH_2.HCl$.

3. Säuren durch Verseifung der nach der Gleichung $RCl + KCN = KCl + RCN$ entstehenden Nitrile.

4. Durch Behandeln mit allen möglichen Silberverbindungen unter geeigneten Umständen gelingt es, unter Halogensilber-Bildung vorher an Ag gebundene Reste mit dem organischen Radikal zu vereinigen z. B. Nitroverbindungen nach der Gleichung $RCl + AgNO_2 \rightarrow AgCl + RNO_2$.

5. Gewinnung der Kohlenwasserstoffe (gesättigter und ungesättigter) aus den Halogenverbindungen mit Metallen vgl. oben S. 176. Aus $\omega—\omega$ Dihalogenverbindungen mit Na können ringförmige Kohlenwasserstoffe gewonnen werden.

6. Durch Behandeln mit reaktiven organischen Na-Verbindungen kann unter Halogen-Na-Bildung eine Vereinigung der Reste erzielt werden z. B. $RCl + NaOR \rightarrow ROR + NaCl$ (Aetherbildung).

7. Metallorganische Verbindungen, Metallalkyle, Metallalkyljodide. Die Einwirkung von Na auf Halogenalkyl führt direkt zum höheren Kohlenwasserstoff (Wurtzsche Reaktion). Bei zweiwertigen Metallen sind intermediär Produkte $Me<^{R}_{J}$ und $Me<^{R}_{R}$ erhältlich. Die schon sehr lange bekannten Zinkverbindungen sind unangenehm stark zersetzlich, entzünden sich z. B. von selbst an der Luft, die von Grignard eingeführten Mg-Verbindungen dagegen, durch Löslichkeit in Aether ausgezeichnet, sind ein bequemes viel angewandtes Ausgangsmaterial für zahlreiche Synthesen geworden.

Darstellung der Halogenderivate anderer Körperklassen. Gemäß dem allgemeinen Prinzip des additiven Verhaltens der einzelnen Gruppen im organischen Molekül, sind die oben genannten Methoden auch geeignet zur Halogenisierung der Kohlenwasserstoffreste in allen möglichen Derivaten. Natürlich unter der sinngemäßen Einschränkung, daß bei der betreffenden Reaktion keine andere Gruppe als der Kohlenwasserstoffrest vorher oder zugleich angegriffen werde. Vor allem bei Chlor kommt dabei seine stark oxydierende Wirkung in Betracht, so daß z. B. bei Alkoholen erst Oxydation zu Aldehyd eintritt[1]) und erst sekundär dieser chloriert wird (Darstellung von Chloral $CCl_3C^{H}_{O}$ aus Alkohol und Chlor). Gechlorte Alkohole die CCl neben COH im Molekül enthalten, sind daher nur gewinnbar nach 3 (S. 197) aus den entsprechenden mehrwertigen Alkoholen. Verbindungen mit der Gruppe $C<^{Cl}_{OH}$

[1]) Die Oxydation geht aber nicht weiter bis zur Säure. Ganz trockenes Chlor und Aldehyd gibt Acetylchlorid $CH_3C^{H}_{O} + Cl_2 \rightarrow CH_3C^{Cl}_{O} + HCl$.

sind überhaupt nicht erhältlich, anstatt ihrer entsteht immer —C=O + HCl. Ebensowenig sind die Kohlenwasserstoffreste in den Aminen chlorierbar, weil Derivate des Chlorstickstoffs entstehen ($RNCl_2$ u. a.). Wohl aber sind die Aether direkt am C chlorierbar, (so kann aus gewöhnlichem Aethyläther erhalten werden C_2H_5—O—CHCl—CH_3), ebenso Ketone[1]) und Säuren (Darstellung von $CH_2ClCOOH$; die Chlorierung geht hier sogar leichter als bei Kohlenwasserstoffen; im Sonnenlicht geht sie bis zur Trichloressigsäure). Vgl. demgegenüber oben Darstellung der Säurechloride mit PCl_5. An diesen Säurechloriden selbst ist die C-Chlorierung leichter als an der Säure selbst durchführbar, so z. B. aus Halogen, Phosphor und freier Säure. Säureanhydride spalten mit Chlor in Säurechlorid und gechlorte Säure.

$$\begin{matrix} CH_3CO \\ \quad O + 2Cl \rightarrow CH_2Cl\,COOH \\ CH_3CO \\ \quad + CH_3COCl \end{matrix}$$

Verhalten des Halogens in anderen Körperklassen. Beeinflussung anderer Gruppen. Im allgemeinen wird das halogenisierte Kohlenwasserstoff-Radikal irgendwelcher organischer Verbindungen ebenfalls der oben geschilderten Umsetzungen fähig sein unabhängig vom Vorhandensein anderer Gruppen. Im besonderen treten indes Beeinflussungen des Halogens durch andere Gruppen und solche dieser letzteren durch Halogen in Erscheinung. Dahin gehört z. B. die Verminderung freier Beweglichkeit des Halogens durch die Doppelbindung und die Erhöhung der Poliymerisierbarkeit bei gechlorten Olefinen.

Weiterhin vermindert Halogen die Stärke vorhandener basischer Gruppen, erhöht dagegen die saurer Gruppen, es vermehrt die Beweglichkeit von Wasserstoffatomen in bestimmter Stellung, wie es seinerseits in der Reaktivität durch benachbarte Gruppen (COOH) stark beeinflußbar ist.

Beispiele: Wachsen der Dissoziationskonstante der gechlorten, gegenüber der von einfachen Säuren (Chloressigsäure, Essigsäure); je mehr Halogenatome, je stärker das Halogen, und je näher einander Halogen und Carboxyl stehen, desto größer ist jene. Leichte Abspaltung von Halogenwasserstoff aus β-Halogen-substituierten Säuren

$$\underset{\beta}{RCHCl} - \underset{\alpha}{CH_2}COOH \rightarrow RCH = CH - COOH + HCl.$$

(α-Halogensäuren gehen dagegen leicht in Oxysäuren, γ-Halogensäuren in Laktone über). Die zu beobachtende Erhöhung der Reaktivität von α-Wasserstoffatomen (— CCl — CH —) ist besonders merkbar, wenn eine α-Methylengruppe zwischen zwei halogentragenden C-Atomen steht (Analogie mit der Gruppierung CO — CH_2 — CO z. B. im Acetessigester).

Einzelne Glieder. An dieser Stelle sind nur Halogenderivate der aliphatischen Kohlenwasserstoffe besprochen, die anderer Verbindungen finden sich in den sie behandelnden Artikeln erwähnt.

Kein einziges der erwähnten Halogenderivate findet sich in der Natur. Alle werden nach den allgemeinen Methoden dargestellt, wenn nicht anders angegeben.

Chlormethyl CH_3Cl Sdp. — 22°

Brommethyl CH_3Br „ — 4°

Früher benutzt zur Kälteerzeugung; zur Extraktion von Blumendüften und zum Methylieren in der Farbstofftechnik.

Jodmethyl CH_3J Sdp. + 44°

Methylierungsmittel in der wissenschaftlichen Laboratoriumspraxis. Fällt direkt alkoholische Silbersalzlösung (Bestimmung der Methoxylgruppe nach Zeisel).

Chloräthyl C_2H_5Cl Sdp. + 12°

Benützt als Anästheticum. Im Sonnenlicht zersetzt. Offizinell. In zugeschmolzenen Röhren gehandelt.

Bromäthyl C_2H_5Br Sdp. + 39°

Als Aether bromatus offizinell. Anästheticum.

Jodäthyl C_2H_5J Sdp. + 42°

Aethylierungsmittel. Lichtbrechend. Früher offizinell; innerlich; das schnell resorbierte Jod erscheint in kürzester Frist im Harn wieder. Fällt Ag-Lösung sofort.

CF_4 Gas. Bildet sich exotherm aus Ruß und Fluor.

Tetrachlorkohlenstoff CCl_4. Durch Verbrennen von Kohle im Chlorstrom. Auch aus Chlor + $CHCl_3$ oder CS_2 erhältlich. Billiges Extraktionsmittel. Greift aber bei Gegenwart von Feuchtigkeit Metallapparate energisch an!

CBr_4 Tafeln. CJ_4 rubinrote Kristalle.

Methylenchlorid, -bromid, -jodid CH_2X_2. Drei durch Reduktion der Trihalogen-Verbindungen erhältliche Flüssigkeiten. CH_2J_2 seines hohen spezifischen Gewichts wegen (etwa 3,3) zur Bestimmung der Schwere von Mineralien benutzt. Aus CH_3J + JH + P. Das Jod ist durch Chlor oder Brom in ihm verdrängbar.

Aethylenchlorid CH_2Cl—CH_2Cl Liquor hollandicus oder Oel der holländischen Chemiker. Aus C_2H_4 mit $SbCl_5$. Riecht wie Chloroform.

Aethylidenchlorid CH_3—$CHCl_2$ Aus Aldehyd mit PCl_5. Angenehmer Geruch. Anäs-

[1]) Aus Aceton entsteht als Endprodukt Perchloraceton C_3Cl_6O. Verbindungen wie das Keton $CH_2ClCOCH_3$ gewinnt man indessen rein aus dem entsprechenden gechlorten Alkohol oder Chlorhydrin durch Oxydation.

thetikum. Die beiden letztgenannten sind Nebenprodukte bei Bereitung des Chlorals aus Cl und Alkohol.
Trimetylenbromid $CH_2Br—CH_2—CH_2Br$ synthetisch häufig gebrauchte Flüssigkeit.
Dichloräthylen $CHCl=CHCl$
Trichloräthylen $CHCl=CCl_2$
Perchloräthylen $CHCl=CCl_2$
Tetrachloräthan $CHCl_2—CHCl_2$
Pentachloräthan $CHCl_2—CCl_3$
ebenso wie die höher chlorierten aus Acetylen gewinnbar und neuerdings im großen dargestellt. Gute Extraktionsmittel (Ersatz für den teueren Aether). Die ersten drei greifen im Gegensatz zu CCl_4 Metalle nicht an. Die beiden letzten werden von wässerigem Alkali angegriffen. Alle sind flüssig. C_2Cl_6 ist fest und riecht nach Kampfer. Die weitaus größte Wichtigkeit besitzen die Trihalogenverbindungen des Methans $CHCl_3$ Chloroform, $CHBr_3$ Bromoform, CHJ_3 Jodoform. Synthetisch wichtig, weil sie durch weite e Halogeneinwirkung in Tetraderivate, durch Reduktion in Diderivate übergehen. Alle drei offizinell, Chloroform als Anästhetikum, Jodoform als Wunddesinfiziens, dessen Wirkung übrigens auf den sich mit den Wundsekreten bildenden Zersetzungsprodukten beruht.

Chloroform. Sdp. 61; spez. Gew. 1,527. Schwere süßlich riechende Flüssigkeit. Brennt schwer mit grüngesäumter Flamme. Unlöslich in Wasser, leicht in organischen Solventien. Ausgezeichnetes Solvens für Harze und bei organischen Synthesen erhaltene Schmieren. Wasser nimmt Geschmack und Geruch des Chloroforms an: Aqua Chloroformii in England sehr gebräuchliches Geschmackskorrigens für Medizinen. Hauptanwendung als Narkotisierungsmittel. Dabei ist, um üble Nebenwirkungen hintanzuhalten, seine Reinheit von größter Wichtigkeit. Unter der Einwirkung von Licht und Feuchtigkeit zersetzt es sich leicht unter Abspaltung von HCl, Chlor, Phosgen und anderen Produkten. Hinderung der Zersetzung durch geringen Alkoholzusatz und Aufbewahrung in braunen Gläsern, die die chemisch wirksamen violetten und ultravioletten Strahlen absorbieren. Alkohol verbindet sich angeblich (Hollemann) mit den Zersetzungsprodukten und hindert, daß diese die Zersetzung katalytisch beschleunigen können. Darstellung: aus Alkohol oder Aceton mit Hypochloriten (Chlorkalk). Der Alkohol geht dabei durch Oxydation in Aldehyd, dieser durch Substitution in Trichloraldehyd oder Chloral, letzteres durch Verseifung in Chloroform und ameisensaures Salz über. Ein reineres Chloroform direkt gewinnbar aus dem (aus Chlor und Alkohol entstehenden) Chloral durch Verseifung mit Kali. Reinigung des Chloroforms durch Ausfrieren nach Pictet. Reaktionen des Chloroforms. In vieler Hinsicht verhält es sich wie ein Perchlorid der Ameisensäure und wirkt bei Gegenwart von KOH wie CCl_2 (nicht bekannt) + HCl (Nef). Mit Anilin und Kalilauge entsteht Phenyl-i-nitril von scheußlichen Geruch. Chromsäure oxydiert zu Phosgen $COCl_2$. Salpetersäure bildet Chlorprikrin CCl_3NO_2 von stechendem Geruch.

Jodoform CHJ_3. Aus Alkohol oder Aceton und Jod + Alkalicarbonat oder -hydroxyd, auch durch Elektrolyse alkoholischer Jodlösung. Die obige erstgenannte Reaktion kann zum Nachweis des Alkohols oder Acetons dienen. Nachweis des Acetons in Methylalkohol, der die Jodoformreaktion nicht gibt. Unlöslich in Wasser (Unterschied der äußerlich ähnlichen Pikrinsäure) mit Wasserdampf flüchtig. Der meist als safranartig (?) bezeichnete Geruch ist in kleinen Dosen nicht unangenehm, in größerer Konzentration höchst widerlich.

Literatur. *Lehr- und Handbücher:* ***V. Meyer und P. Jacobson****, Lehrbuch der organischen Chemie, 2. Aufl. Leipzig 1906.* — ***F. Beilstein****, Handbuch der organischen Chemie, 3. Aufl. Hamburg 1893 bis 1906.* — ***V. v. Richter****, Chemie der Kohlenstoffverbindungen. Bearbeitet von R. Anschütz und Schroeter. 10. Aufl. Bonn 1905.* — ***A. Bernthsen und Mohr****, Kurzes Lehrbuch der organischen Chemie, 10. Aufl. Braunschweig 1909.* — ***Kraft****, Organische Chemie. 4. Aufl. Wien 1905.* — ***A. F. Hollemann****, Lehrbuch der organischen Chemie. 9. Aufl. Leipzig 1911.* — ***Roscoe-Schorlemmer****, Organische Chemie (Teil 1 des ausführlichen Lehrbuchs der Chemie). Braunschweig 1884.* — ***Sellmann****, Prinzipien der organischen Synthese. Berlin 1887.* — ***Euler****, Grundlagen und Ergebnisse der Pflanzenchemie. Braunschweig 1908 und 1909.*

J. Hoppe.

Aliphatische Reihe.

Zur aliphatischen Reihe (ἄλειφαρ = Oel, Fett; „Fettreihe") rechnet man die kettenförmigen („azyklischen") Kohlenstoffverbindungen, die im Gegensatz zu den ringförmigen („zyklischen") stehen (vgl. den Artikel „Systematik und Nomenklatur der organischen Verbindungen"); sie lassen sich alle auf das Methan (vgl. den Artikel „Aliphatische Kohlenwaserstoffe") als Stammsubstanz zurückführen („Methanderivate"). Die Bezeichnung „aliphatisch" rührt daher, daß sehr frühzeitig die zu dieser Gruppe gehörenden Fette und Fettsäuren (vgl. die Artikel „Fette" und „Fettsäuren") näher bekannt wurden. Die offene Kohlenstoffketten enthaltenden aliphatischen Verbindungen weichen in vieler Hinsicht von den geschlossene Kohlenstoffsysteme enthaltenden zyklischen Verbindungen ab, und zwar ist der Unterschied um so größer, je

ungesättigter die zyklischen Systeme sind (Näheres siehe im Artikel „Aromatische Reihe"); mit zunehmender Hydrierung (H-Addition an den Doppelbindungen) nähern sich dagegen die zyklischen Verbindungen immer mehr in ihrem Charakter den Methanderivaten. Am nächsten stehen den letzteren die aus drei, vier oder fünf C-Atomen gebildeten Ringsysteme, d. h. die Trimethylen-, Tetramethylen- und Pentamethylen-Gruppen.

Die gleichen Beziehungen, welche zwischen nur aus C-Atomen zusammengesetzten offenen oder geschlossenen Systemen bestehen, gelten auch für die O, S oder N enthaltenden azyklischen und zyklischen Verbindungen.

K. Schaum.

Alkali oder Alkalien

heißen die stark basischen Hydroxyde von Kalium, Natrium, Lithium, Rubidium und Cäsium: diese Metalle bezeichnet man dementsprechend als Alkalimetalle. Zu den Alkalien rechnet man ferner das wenig lösliche Silberhydroxyd, sodann die Hydroxyde der Erdalkalimetalle Baryum, Strontium, Calcium; außerdem die Hydroxyde des Ammonium und seiner Substitutionsderivate. Alkalische (basische) Reaktion zeigen überhaupt alle wässerigen Lösungen, in denen OH'-Ionen enthalten sind. Vgl. den Artikel „Basen"; ferner die Beschreibung einzelner Hydroxyde an den entsprechenden Stellen z. B. bei „Kalium" im Artikel „Lithiumgruppe" usw.

Alkaloide.

1. Allgemeines. Vorkommen; Darstellung, Verhalten, Konstitution der Alkaloide. 2. Solanaceenbasen. 3. Cocabasen. 4. Strychnosbasen. 5. Curare 6. Chinabasen. 7. Opiumalkaloide. 8. Leichenalkaloide.

1. Allgemeines. Vorkommen, Darstellung, Verhalten, Konstitution der Alkaloide. Mit dem Namen Alkaloide hat man diejenigen in Pflanzen sich vorfindenden stickstoffhaltigen Körper belegt, welche imstande sind, mit Säuren zu salzartigen Verbindungen zusammenzutreten.

Dieser Aehnlichkeit mit dem Ammoniak, dem „flüchtigen Alkali", verdanken sie auch ihren Namen, der von Meißner, dem Entdecker des Veratrins (1821) herrührt.

Diese Alkaloide im weiteren Sinne umfassen Verbindungen verschiedenartigster Konstitution, von solchen sehr einfacher, wie das Methylamin, das sich in Mercurialis annua findet, bis zu so komplizierten Gebilden, wie sie das Berberin und das Chinin darstellen.

Als Alkaloide im engeren Sinne bezeichnet A. Ladenburg solche natürlich vorkommenden Pflanzenbasen, welche ein Stickstoffatom (oder mehrere) in einem zyklischen Ringsystem enthalten.

Allerdings ist auch diese Definition nicht ganz zutreffend, denn es sind auch einige Pflanzenbasen bekannt, die man herkömmlicherweise zu den Alkaloiden rechnet, obwohl sie ihren Stickstoff nicht in ringförmiger Bindung enthalten, solche sind z. B. das Colchicin der Herbstzeitlose und das Ephedrin (aus Ephedra vulgaris = 1 Phenyl 2 methylaminopropan 1 ol), aber auch das Narcein, ein Opiumalkaloid, das in sehr naher Beziehung zum Narkotin steht, enthält seinen Stickstoff ebenfalls in einer aliphatischen Seitenkette.

Aus diesem Grunde ist die Bezeichnung irgendeiner Pflanzenbase als Alkaloid immer mehr oder weniger willkürlich.

Nun ist aber die Zahl der bis jetzt aufgefundenen Pflanzenbasen eine recht beträchtliche — es sind über 250 davon bekannt und ihre Zahl vermehrt sich noch stetig — aber nur von dem kleineren Teile ist die Konstitution so weit aufgeklärt, daß ihre Einreihung in das System der organischen Chemie möglich ist. Deshalb wird man, wenigstens vorläufig, die Alkaloide als eine besondere Körperklasse beibehalten müssen, um so mehr, als sie bei aller Verschiedenheit in ihrer Konstitution doch in ihrem allgemeinen Verhalten manche Aehnlichkeit miteinander zeigen.

Was das Vorkommen der Alkaloide im Pflanzenreiche anbelangt, so liefern die Dikotyledonen weitaus die größte Anzahl der bekannten Alkaloide, während die Monokotyledonen nur verhältnismäßig wenige aufzuweisen haben; aus der Gruppe der Gymnospermen enthalten nur die Eibe, und die Ephedra-Arten Alkaloide, von den Kryptogamen sind, wenn man vom Mutterkorn absieht, nur die Lycopodiaceen alkaloidführend. Durch besonderen Reichtum an Alkaloiden zeichnen sich die Papaveraceen (Opium), Fumariaceen, Solanaceen, Ranunculaceen und Rubiaceen (Chinarinde) aus. Auch in einer großen Anzahl von Papilionaceen und Apocynaceen finden sich Alkaloide. Ziemlich arm daran sind die Kompositen; den Labiaten und den Rosaceen fehlen sie anscheinend ganz. Von den Monokotyledonen enthält nur die Familie der Liliaceen eine größere Anzahl alkaloidhaltiger Pflanzen.

Pflanzen, die sich botanisch nahe stehen, enthalten oft dasselbe Alkaloid oder wenigstens ein solches, das diesem auch in der Konstitution verwandt ist, dagegen ist das

Vorkommen eines und desselben Alkaloides in Pflanzen, welche verschiedenen Familien angehören, sehr selten. Nur das Berberin findet sich außer in Berberideen auch in Caesalpiniaceen, Rutaceen, Ranunculaceen und Papaveraceen. Auch das Protopin kommt außer in Papaveraceen auch in Fumariaceen vor. Dagegen enthalten viele Pflanzen mehrere Alkaloide, die meist in genetischer Beziehung zueinander stehen. Durch besonderen Reichtum an derartigen Alkaloiden sind Papaver somniferum und die Cinchonaarten ausgezeichnet.

Nur selten sind die Alkaloide in der Pflanze in freier Form vorhanden, meist finden sie sich an Säuren, in der Regel organische, gebunden. Fast überall verbreitet sind gerbsaure, oxalsaure und äpfelsaure Salze, weit verbreitet ist ferner, wie neuerdings festgestellt wurde, die Chlorogensäure. Nicht so häufig finden sich milchsaure, essigsaure und schwefelsaure Salze; ein beschränktes Vorkommen haben dann Salze der Fumarsäure in den Erdrauchgewächsen, Akonitsäure in den Ranunculaceen, Chelidonsäure in Chelidonium majus und Veratrum album. Auf das Opium beschränkt zu sein scheint die Mekonsäure, charakteristisch für die Chinarinden ist dann die Chinasäure, die aber in Form eines komplizierten Derivates, der Chlorogensäure, im Pflanzenreiche weiter verbreitet ist.

Die Verteilung der Alkaloide im Pflanzenkörper ist sehr ungleichmäßig. Sie können zwar in sämtlichen Teilen der Pflanze vorkommen, so in Conium maculatum, Hyoscyamus niger und anderen Solanaceen, gewöhnlich aber finden sie sich in gewissen Organen besonders angehäuft. So finden sie sich besonders häufig in den Früchten und Samen, wie in der Arekanuß, den Sabadillsamen und den Brechnüssen, in den Blättern, z. B. in den Cocablättern, dem Tabak und den Jaborandiblättern, in den Wurzeln, z. B. bei Veratrum album und den Eisenhutarten, in der Rinde bei den Cinchonaarten und der Quebrachorinde, im Holze, z. B. bei Coscinium fenestratum einer Menispermacee.

Die Darstellung der Alkaloide aus den Pflanzen gestaltet sich, entsprechend dem sehr wechselnden Verhalten und der größeren oder geringeren Beständigkeit der zu isolierenden Base, so verschieden, daß sich allgemein gültige Angaben darüber nicht machen lassen. Verhältnismäßig einfach gestaltet sich die Sache, wenn der seltene Fall einer flüchtigen Base vorliegt. In diesem Falle macht man das Untersuchungsobjekt alkalisch und destilliert mit Wasserdampf. Das Destillat fängt man in verdünnter Säure auf und gewinnt so direkt eine Lösung des betreffenden Alkaloidsalzes. Bei nichtflüchtigen Alkaloiden wird man in der Regel die Droge mit sehr verdünnter wässeriger oder alkoholischer Mineralsäure, bei sehr empfindlichen Substanzen auch wohl organischer Säure, ausziehen. Die so erhaltenen Auszüge konzentriert man dann unter vermindertem Druck, scheidet das mit in Lösung gegangene Chlorophyll, Harz und Fett ab, macht alkalisch und schüttelt mit einem geeigneten Lösungsmittel, gewöhnlich Aether, Chloroform oder Amylalkohol aus. Durch Abdestillieren des Lösungsmittels erhält man dann die Alkaloide, allerdings meist noch stark verunreinigt. Unter Umständen, wenn es sich um sehr leicht lösliche Verbindungen handelt, wird man aus den sauren Auszügen die Base in Form eines unlöslichen oder schwer löslichen Niederschlages, z. B. als gerbsaures Salz, oder an komplexe Säuren gebunden ausfällen.

Derartige Säuren sind z. B. Wismutjodidjodwasserstoff, Phosphormolybdän- und Phosphorwolframsäure, auch Gold- und Platinchloridchlorwasserstoffsäure können unter Umständen dazu verwendet werden.

Nur wenige Alkaloide und zwar hauptsächlich jene, die nur aus Kohlenstoff, Wasserstoff und Stickstoff bestehen, sind flüssig, so das Coniin und einige dasselbe im Schierling begleitende Basen, ferner das Nikotin und seine Nebenbasen und das Spartein, ein Alkaloid, das sich im Besenginster und in den Lupinen findet. Von wichtigeren sauerstoffhaltigen Alkaloiden sind nur das Arecolin der Betelnüsse und das Pelletierin der Granatwurzelrinde flüssig. Die meisten Alkaloide sind aber feste kristallisierte Körper, die meist nicht unzersetzt destillieren, von denen einige aber sublimierbar sind. Eine kleinere Anzahl von Alkaloiden ist amorph, oder doch bisher nicht in kristallisierter Form erhalten worden, z. B. das Emetin der Brechwurzel, das Ergotoxin des Mutterkornes und einige Alkaloide der Eisenhutarten; auch das Berberin gehört zu diesen Verbindungen, welche aber meist in Form von Salzen kristallisieren, so daß ihre Einheitlichkeit feststeht.

In Wasser sind die Alkaloide meist schwer oder fast nicht löslich, dagegen lösen sie sich in Alkohol, dann Chloroform, Aether, Amylalkohol, Benzol, selten Ligroin und Petroläther. Bemerkenswert ist es, daß manche Alkaloide — z. B. das Strychnin in Aether — sich leicht in gewissen Lösungsmitteln, von denen sie sonst schwer aufgenommen werden, lösen, wenn sie eben aus ihren Salzen frei gemacht sind, d. h. wenn sie noch nicht in die beständige kristallisierte Form übergegangen sind.

Weitaus die Mehrzahl der Alkaloide ist ungefärbt; gelb gefärbt sind das Berberin

und eine Reihe diesem verwandter Basen, rot sind die Salze des Sanguinarins. Häufig dagegen zeigen die Alkaloide besonders in Form ihrer Salze Fluoreszenzerscheinungen, so besonders deutlich das Chininsulfat, dessen wässerige Lösung schön blau fluoresziert.

In der Regel sind die Alkaloide optisch aktiv, meist linksdrehend; manchmal unterscheidet sich die Drehung der freien Base von der ihrer Salze auch durch das Vorzeichen.

Optisch inaktiv sind natürlich die Alkaloide ohne asymmetrisches Kohlenstoffatom, z. B. das Berberin, Narcein, Papaverin, Piperin u. a. Eine razemische Form stellt das Atropin dar, von dem aber zweifelhaft ist, ob es in der lebenden Pflanze vorkommt.

Die basischen Eigenschaften der Alkaloide variieren beträchtlich. Von ziemlich starken Basen, die sogar, wie das Chinin, imstande sind, Karbonate zu bilden, sind alle möglichen Übergänge vorhanden bis zum Hydrastin und Piperin, deren Salze mit Mineralsäuren schon durch Wasser zersetzt werden. Einige besitzen gleichzeitig auch saure Eigenschaften, am bekanntesten sind diese beim Morphin, das man deshalb aus seinen Salzlösungen nicht durch ätzendes Alkali, wohl aber durch Ammoniak ausfällen kann; aber auch andere, wie das Cephaelin, ein Brechwurzelalkaloid, und ein dem Chinin verwandtes Alkaloid, das Cuprein, verhalten sich ebenso, während bei anderen, so dem Pilokarpin, die Lösung in ätzenden Alkalien von einer tiefer greifenden Veränderung begleitet ist.

Die meisten Alkaloide sind einsäurige Basen, auch wenn sie mehr als ein Stickstoffatom enthalten, nur wenige, so die Chinaalkaloide, sind zweisäurig, bei diesen ist aber das zweite Aequivalent Säure weniger fest gebunden als das erste. Die Alkaloidsalze kristallisieren oft gut, namentlich die halogenwasserstoffsauren Salze. Entsprechend den verschiedenen Eigenschaften der Alkaloide sind die Salze der verschiedenen Alkaloide mit einer und derselben Säure nicht immer gleich löslich. Dieses Verhalten kann man benutzen, um die verschiedenen Alkaloide voneinander zu unterscheiden.

Von einfachen Säuren, die mit Alkaloiden Niederschläge geben, welche man mit zur Charakterisierung der Alkaloide heranziehen kann, sind als wichtigste zu nennen die Gerbsäure, welche aber nur amorphe Niederschläge gibt, dann Pikrinsäure und Pikrolonsäure. Besser noch sind vielfach komplexe Säuren geeignet; diese Säuren verwendet man oft in Form ihrer Salze, die man dann zu einer Lösung des Alkaloids in einer Mineralsäure hinzugibt. Solche sind z. B. Phosphormolybdänsäure, Phosphorwolframsäure, Silicowolframsäure, dann Jodjodwasserstoffsäure und Jodjodkalium, ferner andere jodhaltige Säuren in Form ihrer Kaliumsalze, so Cadmium-, Quecksilber-Zink- und Wismutjodidjodkali, endlich salzsaure Quecksilberchloridlösung, Gold- und Platinchloridchlorwasserstoffsäure; auch die komplexen Cyanverbindungen leisten zu diesem Zwecke oft gute Dienste.

Die meisten Alkaloide sind tertiäre Basen, nur wenige, wie Coniin, Ephedrin, Colchicin u. a. haben den Charakter der sekundären Amine. Nur wenige sind quaternäre Verbindungen, wie das zu den Betainen gehörige Trigonellin, dann aber auch das Berberin, Curare und einige künstliche Alkaloidderivate. Primäre Amine finden sich unter den eigentlichen Alkaloiden nicht vor.

Zur Ermittelung der Art der Stickstoffbindung bedient man sich gewöhnlich der Einwirkung von Jodmethyl auf die betreffende Base. Sekundäre Amine liefern dabei zunächst, allerdings schwierig, tertiäre, die tertiären liefern quaternäre Ammoniumbasen. Auf Basen, welche an sich schon quaternär sind, wirkt Jodmethyl natürlich nicht ein.

Eine große Anzahl von Alkaloiden enthält am Stickstoff eine Methylgruppe. Die jodwasserstoffsauren Salze solcher Verbindungen spalten bei der trockenen Destillation, d. h. in der Regel bei höherer Temperatur, Jodmethyl ab. Diese Spaltung führt man in einem von Herzig und Meyer angegebenen Apparate aus, leitet das Jodmethyl in alkoholische Silbernitratlösung und berechnet aus der Menge des dabei entstandenen Jodsilbers die Anzahl der vorhandenen Methylimidgruppen.

Viele Alkaloide sind Ester, einige wenige, wie das Colchicin, auch Säureamide. Bei der Verseifung durch Wasser bei höherer Temperatur, mit Alkalilaugen oder auch mit Säure zerfallen sie in der Regel in einen stickstoffhaltigen und einen stickstofffreien Anteil. So zerfällt das Solanin der Kartoffelkeime in zwei Zuckerarten und Solanidin, einen stickstoffhaltigen Körper; das Solanin ist also eines der seltenen Glyko-Alkaloide. Das Cocain liefert bei der Verseifung Ekgonin, einen Körper, der gleichzeitig Säure, Base und Alkohol ist, Benzoesäure und Methylalkohol. Das Pfefferalkaloid gibt bei der Spaltung Piperinsäure und Piperidin, in ihm liegt also ein Säureamid vor.

Ein derartiger Zerfall eines Alkaloides läßt außer auf die Natur des in der Base vorhandenen Stickstoffs unter Umständen auch auf die des in der Base enthaltenen Sauerstoffs Schlüsse ziehen. Dieser Sauerstoff kann, außer wie im vorher besprochenen Falle,

auch als freier Hydroxylsauerstoff vorliegen. Hydroxyle weist man durch Acylierung nach. Aus der Analyse der so erhaltenen Ester erfährt man dann direkt die Anzahl der in dem Alkaloid vorhandenen Hydroxylgruppen.

Sind die Hydroxylgruppen, was aber selten der Fall ist, phenolartiger Natur, so wird man sie methylieren.

Derartige Methoxylgruppen, und solche finden sich sehr häufig auch schon fertig gebildet in den Alkaloiden vor, lassen sich nach der Methode von Zeisel durch Kochen mit Jodwasserstoff als Jodmethyl abspalten, das mit alkoholischer Silbernitratlösung Jodsilber liefert. Am Stickstoff vorhandenes Methyl stört dabei in der Regel nicht; man kann meist in dem Rückstand von der Methoxylbestimmung durch Erhitzen auf höhere Temperatur auch das Methylimid, das etwa vorhanden ist, bestimmen. Aus der Menge des entstandenen Jodsilbers berechnet man dann die Anzahl der vorhandenen Methoxylgruppen und der phenolartigen Hydroxyle.

Durch wasserabspaltende Mittel läßt sich manchmal aus hydroxylhaltigen Basen Wasser abspalten. Die dadurch entstehenden ungesättigten Verbindungen sind oft reaktionsfähiger als die ursprünglichen Alkaloide und haben deshalb bei der Konstitutionsermittelung derselben eine Rolle gespielt, so bei den Solanaceenbasen, den Chinaalkaloiden u. a.

Ist der Sauerstoff der Pflanzenbase als Carbonylgruppe vorhanden, so wird man diese durch die üblichen Ketonreagentien nachweisen können. Die Carboxylgruppe wird sich meist durch Behandeln mit Alkohol und Salzsäure esterifizieren lassen. Allerdings kann auch die Carboxylgruppe durch Bindung im Molekül selbst festgelegt sein, so ist das Trigonellin des Bockshornsamens ein Betain, Narkotin und Hydrastin sind Laktone.

Näheren Aufschluß über die Konstitution eines Alkaloides und über das ihm zugrunde liegende Ringsystem gewinnt man dann durch Abbaureaktionen.

Eine der ältesten ist die trockene Destillation mit Kalk oder Aetzkali, wobei, allerdings meist unter Zertrümmerung des Moleküls, einfachere Verbindungen entstehen; immerhin ist bei der Deutung der Ergebnisse eine gewisse Vorsicht notwendig, da manchmal die zunächst entstehenden Spaltstücke bei der hohen Temperatur leicht Kondensationen eingehen. Durch Destillation mit Aetzkali erhielt z. B. Gerhardt aus Cinchonin das Chinolin.

Auch hohe Temperatur allein genügt unter Umständen zum Abbau eines Alkaloides, so gibt z. B. das Ekgonin beim trockenen Erhitzen Dämpfe, welche die Knorr sche Pyrrolreaktion geben. Häufiger noch hat die Destillation mit Zinkstaub gute Fingerzeige geliefert. So erhielten Knorr und Vongerichten auf diese Weise aus Morphin das Phenanthren, A. W. Hofmann aus Coniin (α-Propylpiperidin) das Conyrin (γ-Propylpyridin); der Zinkstaub, der gewöhnlich, auch bei der trockenen Destillation, sauerstoffziehend wirkt, kann also auch wasserstoffabspaltend wirken. In ähnlicher Weise kann auch durch sehr gelinde wirkende Oxydationsmittel manchmal ein Abbau zu bekannten Verbindungen erreicht werden, auch hat man durch einfache Wasserstoffabspaltung Alkaloide erhalten, welche sich neben dem Hauptalkaloid in der Pflanze finden. Solche schwach oxydierenden Mittel sind die Salze der Edelmetalle. Koenigs erhielt z. B. durch Erhitzen von Merochinen, einem wichtigen Spaltungsprodukt des Chinins, mit salzsaurer Sublimatlösung β-Aethyl γ-methylpyridin, eine Beobachtung, die viel zur Konstitutionsermittelung des Chinins beigetragen hat. Aehnlich milde wirkende Oxydationsmittel sind u. a. Schwefelsäure bei nicht zu hoher Temperatur, durch die z. B. Piperidin in Pyridin übergeführt wurde, ferner Ferricyankalium, Ferrisalze, Sauerstoff der Luft, Jodlösung u. a. Wasserstoffsuperoxyd liefert zum Teil Aminoxyde, welche die Gruppe $>N=O$ enthalten.

Stärkere und oft tief greifende Oxydationsmittel, welche meist in verschiedenster Art wirken, sind Permanganat, Chromsäure und Salpetersäure.

Eine weitere sehr wichtige Abbaureaktion ist die Methode der erschöpfenden Methylierung nach A. W. Hofmann. Erhitzt man nämlich quaternäre cyklische Ammoniumbasen, solche kommen bei Alkaloiden fast nur in Betracht, so zerfallen sie, wie A. Ladenburg nachgewiesen hat, unter Aufspaltung des Ringsystems. In dem einfachen Falle des Piperidins gestaltet sich die Spaltung folgendermaßen. Methylpiperidiniummethylhydroxyd 1, liefert bei trockener Destillation eine aliphatische tertiäre Base, das sogenannte Dimethylpiperidin, 2, dessen quaternäre Verbindung, das Δ_4-Pentenyltrimethylammoniumhydroxyd, 3, bei nochmaliger Erhitzung in einen ungesättigten Kohlenwasserstoff, 4, Trimethylamin und Wasser zerfällt. Der so erhaltene Kohlenwasserstoff enthält noch alle C-Atome, welche in dem unveränderten Ringsystem vorhanden waren.

```
 CH3.CH3OH                       CH3CH3
      \ /                             /
     / N \                        / N
 H2C      CH2             CH2      CH2
    1     |    ---> H2O +     2    ||
 H2C      CH2             CH2      CH
    \CH2/                    \CH2/

          CH3CH3OH
             \ /
       CH3    N
        CH2/     CH2         CH2       CH3
 --->       3    ||   --->   ||    4
        CH2      CH          CH        CH
          \CH2/                 \CH//
                              α-Methylbutadiën
            + (CH3)3N + H2O.
```

Die H o f m a n n sche Abbaureaktion ist mit Erfolg bei verschiedenen Alkaloiden angewendet worden, beim Coniin, Tropin, Cocain u. a. Die so erhaltenen stickstofffreien Produkte ließen sich dann in vielen Fällen durch einfache und durchsichtige Reaktionen in bekannte Verbindungen überführen.

Vielleicht werden auch die von J. v. B r a u n angegebenen Methoden der Aufspaltung cyklischer Basen mit Halogenphosphor, die bisher nur bei sekundären Basen anwendbar ist, und die Aufspaltungsmethode mit Hilfe von Bromcyan, die von demselben Autor herrührt, auch für die Alkaloidforschung allgemeinere Bedeutung gewinnen.

Was die Einteilung der Alkaloide anbelangt, so bevorzugte man früher, als die Erforschung dieser Basen noch nicht so weit vorgeschritten war, die botanische, d. h. man handelte die Alkaloide nach den Pflanzenfamilien ab, in denen sie sich fanden. Diese Einteilung benutzt man auch heute noch für die wenig gekannten Alkaloide. Für die besser bekannten von ihnen aber zieht man eine Systematik vor, welche sich auf die Ringsysteme stützt, die den Kern dieser Alkaloide bilden. Man unterscheidet demnach die Alkaloide der Pyridingruppe, zu denen u. a. das Coniin, die Arekaalkaloide und das Piperin gehören, dann die Pyrrolidingruppe mit den Solanaceen und Cocabasen, die aber gleichzeitig, wie auch das Nikotin des Tabaks als Pyridinderivate aufgefaßt werden können. Ferner die Chinolingruppe, deren wichtigste die Chinaalkaloide und die Strychnosbasen sind, weiter die Isochinolinderivate, zu denen das Hydrastin, Berberin und der an Zahl überwiegende Teil der Opiumbasen gehören, und endlich die Gruppe der Phenanthrenderivate, die das Morphin und seine Verwandten umfaßt. Den der Harnsäure nahestehenden Purinderivaten, Coffein, Theobromin und Theophyllin, über deren Zugehörigkeit zu den Alkaloiden man zweifelhaft sein kann, schließt sich dann als Imidazolderivat das Pilocarpin an.

Im nachstehenden wird auf die wichtigsten Alkaloide etwas näher eingegangen werden, für die weniger wichtigen und für ein eingehenderes Studium muß auf die unter „L i t e r a t u r" aufgeführten Monographien verwiesen werden.

2. Solanaceenbasen. In einer Reihe von Solanaceen finden sich Alkaloide, die meist in einer nahen Beziehung zueinander stehen. Das wichtigste von ihnen ist das Hyoscyamin $C_{17}H_{23}NO_3$, das sich in H y o s c y a m u s n i g e r und m u t i c u s, in Atropa-Arten (Belladonna und Mandragora), in Datura-Arten, ferner in S c o p o l i a j a p o n i c a und D u b o i s i a m y o p o r o i d e s vorfindet. Das Hyoscyamin, das optisch aktiv, linksdrehend, ist, geht sehr leicht in seine Razemform das Atropin, über, so daß man bei nicht sehr vorsichtiger Verarbeitung hyoscyaminhaltiger Drogen nicht Hyoscyamin, sondern das inaktive Atropin erhält. Natürlich ist es aber auch nicht ausgeschlossen, daß sich auch etwas Atropin in der lebenden Pflanze vorfinden kann.

Wir wollen zunächst auf die Konstitution des länger bekannten Atropins eingehen, das schon 1831 von M e i n entdeckt wurde.

Das Atropin wird durch verseifende Mittel in eine stickstofffreie Säure, die Tropasäure und ein Alkamin, das Tropin, gespalten und läßt sich umgekehrt aus diesen Spaltstücken wieder aufbauen; das Atropin ist demnach der Tropasäureester des Tropins.

$$\underset{\text{Atropin}}{C_{17}H_{23}NO_3} + H_2O \rightleftarrows \underset{\text{Tropasäure}}{C_6H_5.CH\begin{cases}CH_2OH\\COOH\end{cases}} + \underset{\text{Tropin}}{C_8H_{15}NO}$$

Beide Spaltstücke sind synthetisch erhalten worden. Die Tropasäure, die chemisch als α-Phenylhydracrylsäure zu bezeichnen ist, haben L a d e n b u r g und R ü g h e i m e r 1880 von Acetophenon aus aufgebaut.

Auch das Tropin ist künstlich dargestellt worden. Auf Grund der Arbeiten zahlreicher Chemiker, von denen besonders L a d e n b u r g, M e r l i n g und W i l l s t ä t t e r zu nennen sind, gestaltet sich diese Synthese folgendermaßen:

Aus dem Suberon, dem Keton, das man durch trockene Destillation des Kalksalzes der Korksäure erhält, stellte W i l l s t ä t t e r auf ziemlich umständlichem Wege einen Kohlenwasserstoff dar, der das Ausgangsmaterial für die Tropinsynthese bildet. Dieser Körper, das Tropiliden (Cycloheptatrien), gibt mit Bromwasserstoff ein

Additionsprodukt, in welchem sich das Brom mit Hilfe von Dimethylamin durch die Dimethylaminogruppe ersetzen läßt. Diese Base ist identisch mit einer beim Tropinabbau erhaltenen und α-Methyltropidin genannten Base

```
CH2—CH2—CH2          CH = CH - CH
                     |         ||   HBr
       C=O                     CH  ——>
                               |
CH2—CH2—CH2          CH2—CH=CH
    Suberon               Tropiliden

     CH2—CHBr—CH
               |     (CH3)2NH
               CH  ——>
               |
     CH2 -CH  =  CH
       Monohydrobromid

     N—(CH3)2               N—(CH3)2
     |                      |
CH2—CH—CH             CH2—CH—CH2
       ||   2H               |    2Br
       CH ——>                CH2 ——>
       |                     |
CH2—CH=CH             CH2—CH=CH
 α-Methyltropidin       Δ4-Methyltropan

           N.(CH3)2
           |
     CH2—CH — CH2
     |          |
     |          CH2
                |
     CH2—CHBr—CHBr
          Bromid
```

Durch Reduktion geht das α-Methyltropidin über in Δ_4-Methyltropan, das seinerseits in der Kälte zwei Atome Brom addiert. Dieses Dibromid lagert sich in der Wärme rasch um in Bromtropanmethylammoniumbromid, wodurch eine Stickstoffbrücke gebildet wird. Bei der Einwirkung von Aetzkali spaltet dieses Produkt Bromwasserstoff ab und liefert Tropidinbrommethylat, das nunmehr durch trockene Destillation in Methylbromid und Tropidin zerfällt

```
CH2—CH — CH2          CH2—CH — CH2
    | /CH3 |              | /CH3 |
    N—CH3 CH2 ——>   |     N--CH3 CH
    | \Br  |              \Br    ||
CH2—CH — CHBr         CH2—CH — CH
Bromtropanmethyl-     Tropidinbrommethylat.
ammoniumbromid.

        CH2—CH — CH2
            |     |
  ——>  |    N—CH3 CH
            |     ||
        CH2—CH — CH
           Tropidin.
```

Die Ueberführung des α-Methyltropidins in Tropidin läßt sich, außer auf die eben geschilderte Weise, auch durch Ueberführung in ψ-Methyltropin, Bromieren desselben und nachfolgende Reduktion des umgelagerten Produkts bewerkstelligen.

Das Tropidin addiert Bromwasserstoff unter Bildung von 3-Bromtropan, das beim Erhitzen mit Schwefelsäure ein Isomeres des Tropins, das ψ-Tropin liefert

```
CH2—CH — CH2      CH2—CH — CH2
    |     |  ——>      |     |
    N-CH3 CHBr        N-CH3 CHOH
    |     |           |     |
CH2—CH — CH2      CH2—CH — CH2
 3-Bromtropan        ψ-Tropin.
```

Das ψ-Tropin ist stereoisomer mit dem Tropin. Es ist die dem Tropakokain zugrunde liegende Base. Es ist auch beständiger als das Tropin, das leicht in Pseudotropin übergeht. Erst auf einem Umwege ist es gelungen die entgegengesetzte Umwandlung zu erzielen. Bei der Oxydation liefert ψ-Tropin ein Keton, das Tropinon, das auch bei der gleichen Behandlung des Tropins entsteht

```
CH2—CH — CH2      CH2—CH  —  CH2
    |     |           |      |
    N.CH3 CO          N.CH3  HC—OH
    |     |           |
CH2—CH — CH2      CH2—CH  —  CH2
   Tropinon            Tropin.
```

Das Tropinon liefert bei der Reduktion mit Zinkstaub und Jodwasserstoffsäure Tropin, das sich als vollständig identisch erwies mit dem durch Verseifung des Atropins erhaltenen. Das Atropin besitzt daher folgende Struktur

```
H2C—CH ——CH2        C6H5
    |      |       *  /
    N.CH3  HCOCOCH
    |      |          \
H2C—CH     CH2         CH2OH
```

Das Tropin selbst ist optisch inaktiv. Durch Verestern mit der razemischen Tropasäure entsteht das ebenfalls inaktive Atropin Verwendet man dagegen zur Veresterung die aktiven Formen der Tropasäure, so erhält man optisch aktive Tropeine, von denen das linksdrehende identisch ist mit dem natürlichen Hyoscyamin.

Atropin und Hyoscyamin sind starke einsäurige Basen, die in kaltem Wasser schwer löslich sind, in heißem lösen sie sich leichter. Die wässerigen Lösungen der freien Basen sind sehr zersetzlich, schon nach verhältnismäßig kurzer Zeit enthalten sie nicht mehr die freie Base, sondern tropasaures Tropin. In Form der Salze sind die Basen wesentlich beständiger.

Charakteristisch für Atropin und Hyos-

cyamin ist ihre Eigenschaft die Pupille zu erweitern. Nach Feddersen tritt beim Menschen noch bei 0,0002 mg Atropin Mydriasis auf. Von chemischen Reaktionen sit die wichtigste die von D. Vitali angegebene. Trocknet man wenig (0,01) Atropin mit etwas rauchender Salpetersäure auf dem Wasserbade ein, so nimmt der nur schwach gefärbte Rückstand beim Befeuchten mit alkoholischer Kalilauge eine violette Färbung an.

Bei Behandlung mit wasserentziehenden Mitteln, wie Schwefelsäure, Säureanhydriden oder Salpetersäure verliert das Atropin ein Molekül Wasser und geht in Apoatropin über. Das Apoatropin ist der Tropinester der Atropasäure (= α-Phenylacrylsäure $C_6H_5C\Big\langle{CH_2 \atop COOH}\Big)$

Das Apoatropin, auch Atropamin genannt, findet sich in geringer Menge in der Belladonnawurzel und ebenso sein Isomeres, das Belladonnin ($C_{17}H_{21}NO_2$), das man auch aus dem Apoatropin durch Behandeln mit Säuren erhalten kann.

Wichtiger als diese Nebenbasen des Hyoscyamins ist dann ein ebenfalls in vielen Solanaceen sich vorfindendes Alkaloid, das Scopolamin, das sich, allerdings in geringerer Menge als jenes, in Hyoscyamus niger, in Duboisia myoporoides, ferner in den Wurzeln von Scopolia japonica und atropoides, in Atropa Mandragora, und schließlich in Datura Stramonium, alba, arborea und Metel findet. Die drei letzten Pflanzen, besonders die letzte, enthalten vorwiegend Scopolamin.

Das Scopolamin stellt man gewöhnlich aus den Mutterlaugen der Atropinfabrikation über das gut kristallisierende bromwasserstoffsaure Salz dar.

Das Scopolamin ist ebenfalls ein Tropasäureester mit einem eigentümlichen Scopolin genannten Alkamin. Es zerfällt demnach bei der Verseifung in Tropasäure und Scopolin

$$\underset{\text{Scopolamin}}{C_{17}H_{21}O_4N} + H_2O = \underset{\text{Tropasäure}}{C_6H_5CH\Big\langle{CH_2OH \atop COOH}} + \underset{\text{Scopolin}}{C_8H_{13}NO_2}$$

Die Konstitution der Tropasäure ist, wie schon oben bemerkt wurde, völlig aufgeklärt, von dem Scopolin, das farblose Kristalle F. 110° bildet, ist verhältnismäßig wenig bekannt, bei seiner Oxydation entsteht Pyridinmethylsulfat. Das Scopolamin ist optisch aktiv, linksdrehend, durch ätzende Alkalien, auch durch Silberoxyd wird es razemisiert, es geht in inaktives Scopolamin über. Dieses Scopolamin bildet Hydrate mit 1 und 2 Mol Kristallwasser, das letztgenannte Hydrat hat man auch als Atroscin als besonderes Alkaloid beschrieben. Das bromwasserstoffsaure Salz des i-Scopolamins ist das Euscopol des Handels.

Außer den beschriebenen Alkaloiden sind noch einige sehr wenig bekannte und teilweise wohl auch zweifelhafte Basen aus Solanaceen isoliert worden, so das Mandragorin aus Atropa Mandragora, das Pseudohyoscyamin aus Duboisia myoporoides und das Meteloidin aus Datura Metel.

Ebenso, wie man aus den Spaltungsstücken des Atropins dieses wieder aufbauen kann, kann man das Tropin auch mit anderen Säuren verestern und erhält so die sogenannten Tropeine, die zum Teil ähnlich wirken wie das Atropin.

Die wichtigste dieser Verbindungen ist das aus razemischer Phenylglykolsäure (Mandelsäure) und Tropin entstehende Homatropin (= Oxytoluyltropein)

$$\underset{\text{Mandelsäure}}{C_6H_5.CHOH.COOH} + \underset{\text{Tropin}}{C_8H_{15}NO}$$
$$= \underset{\text{Homatropin.}}{C_{16}H_{21}O_3N} + H_2O$$

Auch viele andere derartige Tropeine hat man dargestellt. Sie haben deshalb besonderes Interesse erregt, weil sie die ersten synthetisch gewonnenen Alkaloide darstellen.

3. Cocabasen. In naher Beziehung zu den Alkaloiden der Solanaceen stehen dann die Basen, welche sich in Erythroxylum coca vorfinden. Besonders augenfällig sind diese Beziehungen bei dem Tropacocain, einem Alkaloid, das sich in einer auf Java kultivierten schmalblättrigen Varietät des Kokastrauches vorfindet.

Das Tropacocain ist der Benzoesäureester des ψ-Tropins eines Isomeren des Tropins. Nach Willstätter sind Tropin und Pseudotropin geometrisch isomer; ihre Isomerie läßt sich durch folgende Formeln gut veranschaulichen, wobei es allerdings unentschieden bleiben muß, welche von den beiden Formeln dem Tropin und dem ψ-Tropin zukommt

```
CH2—CH ——— CH2            CH2—CH ——— CH2
|    |      |             |    |      |
|  N.CH3  H.COH   und     |  N.CH3  HOCH
|    |      |             |    |      |
CH2—CH ——— CH2            CH2—CH      CH2
```

Die Spaltung des Tropakokains in ψ-Tropin und Benzoesäure hat Liebermann durch Kochen mit Salzsäure ausgeführt. Derselbe Forscher hat gleichzeitig auch durch Erhitzen von ψ-Tropin mit Benzoesäureanhydrid die Base wieder regeneriert (1891)

$$\underset{\psi\text{ Tropin}}{C_8H_{15}ON} + \underset{\text{Benzoesäureanhydrid}}{(C_6H_5CO)_2O} = \underset{\text{Benzoesäure}}{C_6H_5COOH} +$$

$$\begin{array}{lll} CH_2-CH & & CH_2 \\ & & | \\ & N.CH_3 & HCOCOC_6H_5 \\ & & | \\ CH_2-CH & & CH_2 \end{array}$$

Tropacocain.

Da das ψ-Tropin nach den Untersuchungen von Willstätter synthetisch zu erhalten ist, so gilt das gleiche auch von dem Tropacocain.

Schon vor der Entdeckung des Tropacocains hatte Einhorn einen Beweis des Zusammenhanges des Tropins mit den Cocabasen erbracht.

Das Cocain, die wichtigste in den Cocablättern enthaltene Base wird beim Erhitzen mit verdünnten Mineralsäuren, Aetzbaryt oder Alkalilaugen gespalten in Benzoesäure, Methylalkohol und Ekgonin

$$\underset{\text{Cocain}}{C_{17}H_{21}O_4N} + 2H_2O = \underset{\text{Ekgonin}}{C_9H_{15}O_3N} + \underset{\text{Benzoesäure}}{C_6H_5COOH} + \underset{\text{Methylalkohol.}}{CH_3OH.}$$

Das Ekgonin ist eine tertiäre, am Stickstoff methylierte Base, die gleichzeitig noch als einwertiger Alkohol und als einbasische Säure reagiert.

Das Ekgonin gibt mit wasserentziehenden Mitteln ein H_2O ab und liefert das Anhydroekgonin, aus dem Einhorn durch Erhitzen mit Salzsäure CO_2 und Tropidin erhielt. Das Tropidin (vgl. S. 207) hatte man schon früher aus dem Tropin durch Abspaltung von einem Mol H_2O erhalten. Das wies darauf hin, daß das dem Cocain zugrunde liegende Ekgonin eine Tropinkarbonsäure darstelle.

In der Tat hat dann R. Willstätter 1903 von dem Tropinon, dem ersten Oxydationsprodukte des Tropins, ausgehend, synthetisch ein Ekgonin erhalten, das mit dem gewöhnlichen l-Ekgonin in den meisten Eigenschaften übereinstimmt, sich von ihm aber durch den Mangel der optischen Aktivität unterscheidet. Willstätters Ekgonin ist zwar nicht die razemische Form des natürlichen l-Ekgonins, sondern leitet sich von einem alkalistabilen Pseudoekgonin ab, das zu der natürlichen Base wahrscheinlich in einem ähnlichen Verhältnisse steht, wie das Tropin zum Pseudotropin. Trotzdem darf durch seinen Aufbau die Frage nach der Konstitution des Ekgonins und damit des Cocains als im wesentlichen gelöst betrachtet werden. Das Tropinon ist ein Keton, das man sowohl durch Oxydation des Tropins, als des ψ-Tropins erhalten kann (vgl. S. 207). Ein Wasserstoffatom des Tropinons läßt sich durch Natrium ersetzen. Bei der Einwirkung von CO_2 auf dieses Natriumsalz entsteht dann ein Gemenge zweier Tropinonkarbonsäuren, das bei der Reduktion ein Gemisch zweier Verbindungen von der Zusammensetzung des Ekgonins ergibt. Die eine dieser Verbindungen ist ein wahres Ekgonin, während das zweite, das in besserer Ausbeute entsteht, ein Kohlensäureester des ψ-Tropins ist. Die Reaktion erfolgt nach Willstätter in folgender Weise

$$\begin{array}{lll} CH_2-CH-CH_2 & & CH_2-CH-CH \\ |\quad N.CH_3\quad CO & \xrightarrow{Na} & |\quad NCH_3\quad CONa \\ CH_2-CH\quad CH_2 & & CH_2-CH-CH_2 \\ \text{Tropinon} & & \text{Na-Salz der Enolform des Tropinons} \end{array}$$

$$\xrightarrow{CO_2} \begin{array}{l} CH_2-CH-CH \\ |\quad N.CH_3\quad COCOONa \\ CH_2-CH-CH_2 \end{array}$$

Tropinonkohlensaures Na

Das Tropinonnatrium reagiert zunächst mit CO_2 unter Bildung von tropinonkohlensaurem Natrium, das zum Teil weiter CO_2 addiert, wobei unter Umlagerung das Natriumsalz einer Dikarbonsäure entsteht

$$\begin{array}{l} CH_2-CH-CH \\ |\quad N.CH_3\quad \overset{\|}{C}OCOONa \\ CH_2-CH-CH_2 \end{array} \quad \text{Umlagerung}$$

Tropinon-o-karbonsaures Na

$$\longrightarrow \begin{array}{l} CH_2-CH-CNa \\ |\ \ {}^{CH_3}_{H}\!\!>N\text{-}O\text{-}CO\text{-}C + CO_2 \\ \qquad\qquad\quad \overset{\|}{O} \\ CH_2\quad\text{-}CH\quad CH_2 \end{array}$$

$$\longrightarrow \begin{array}{l} CH_2\quad CH\quad C-COONa \\ |\ \ {}^{CH_3}_{H}\!\!>N\text{-}O.C.O\text{-}C \\ \qquad\qquad \overset{\|}{O} \\ CH_2-CH-CH_2 \end{array}$$

Natriumsalz der Dikarbonsäure.

Bei der Reduktion in alkalischer Lösung wird dann die am Sauerstoff haftende Carboxylgruppe abgespalten, und es entsteht Ekgonin

$$\begin{array}{l} CH_2-CH-C.COONa \\ |\ \ {}^{CH_3}_{H}\!\!>N\text{-}OCOC \\ \qquad\qquad \overset{\|}{O} \\ CH_2-CH\quad CH_2 \end{array} + H_2 = CO_2$$

Na-Salz der Dikarbonsäure

$$+ \begin{array}{l} CH_2-CH-CH.COONa \\ |\quad N.CH_3\quad CHOH \\ CH_2-CH\quad CH_2 \end{array}$$

r. Ekgoninnatrium.

Es ist auch nicht ausgeschlossen, daß von vornherein ein Teil des Tropinonnatriums als Ketonsalz reagiert und direkt in Tropinon-β-karbonsäure übergeht, die bei der Reduktion dann ebenfalls in r. Ekgonin übergeht

```
CH2—CH     CHNa
 |          |
   N.CH3   CO + CO2
 |          |
CH2—CH     CH2
```

Na-Salz der Ketoform des Tropinons

```
    CH2—CH — CH.COONa
     |        |
 =   NCH3    CO        + 2H
     |        |
    CH2—CH — CH2
```

β-Tropinonkarbons. Na

```
    CH2—CH — CH—COONa
         |    |
 =      NCH3 CHOH
         |    |
    CH2—CH — CH2
```

r. Ekgoninnatrium

Durch Benzoylieren und Methylieren läßt sich das r. Ekgonin leicht in r. Cocain überführen

```
CH2—CH——CH.COOCH3
     |    |
    N.CH3 CHOCO.C6H5   Cocain.
     |    |
CH2—CH    CH2
```

Ebenso wie das synthetische Ekgonin läßt sich auch das natürliche Ekgonin durch Methylieren und Benzoylieren leicht in ein mit dem natürlichen Cocain identisches Alkaloid verwandeln. Diese Tatsache ist auch technisch von Bedeutung, weil beträchtliche Mengen von Ekgonin aus den sonst nicht verwertbaren Nebenbasen des Cocains gewonnen werden und auf diese Weise in das wertvolle Cocain übergeführt werden können.

Die Darstellung des Cocains geschieht jetzt am Orte der Cocapflanzungen selbst, weil beim Transport der Gehalt der Blätter stark zurückgeht. Man zerkleinert die frischen Blätter und behandelt sie unter Umrühren mit einem Gemisch von Sodalösung und Petroleum. Das Petroleum nimmt dabei die in Freiheit gesetzten Alkaloide auf. Nach dem Abtrennen der Petroleumschicht entzieht man ihr durch Ausschütteln mit Salzsäure die Alkaloide. Aus der sauren Lösung fällt man durch Sodazusatz das Rohcocain aus, das abgepreßt und meist in Europa weiter verarbeitet wird.

Das Cocain bildet farblose monokline Prismen von F. 98°. Es ist linksdrehend, seine Salze, von denen das salzsaure das wichtigste ist, kristallisieren meist gut, sie reagieren neutral.

In den Cocablättern wird das Cocain von einer ganzen Reihe von anderen Alkaloiden begleitet. Diese Basen, von denen übrigens die eine oder die andere in den verschiedenen Blättersorten manchmal fehlt, zerfallen in solche, die bei der Spaltung alle ein und dasselbe l-Ekgonin liefern und solche, die sich von einer anderen Grundsubstanz ableiten. Zur ersten Gruppe gehören das Cinnamylcocain $C_{19}H_{23}NO_4$, das bei der Hydrolyse in Ekgonin, Methylalkohol und Zimtsäure zerfällt, dann die Truxilline, von denen nicht weniger als vier Isomere bekannt sind. Die Truxilline sind Abkömmlinge von polymeren Zimtsäuren, denn sie liefern bei der Spaltung neben Ekgonin und Methylalkohol die Truxillsäuren, die folgende Konstitution besitzen

```
   C6H5CH—CH COOH
          |   |
HOOC.CH—CH.C6H5
```

α-Truxillsäure

```
C6H5CH—CH.COOH
   |    |               C6H5CH=CH.COOH
C6H5CH—CH COOH
```

β-Truxillsäure Zimtsäure.

Ferner kommen darin vor das Benzoylekgonin $C_{16}H_{19}O_4N + 4\,aq$ und das Cinnamylekgonin $C_{18}H_{21}O_4N$. Keine Derivate des l-Ekgonins sind das d-Cocain $C_{17}H_{21}O_4N$, das kein optischer Antipode des gewöhnlichen Cocains ist, sondern sich von einem alkalibeständigen Stereoisomeren des gewöhnlichen l-Ekgonins, dem l-ψ-Ekgonin ableitet, dann das schon oben erwähnte Tropacocain und endlich die sogenannten Hygrine. Die Hygrine sind flüchtige flüssige Basen, die keine besondere Wichtigkeit besitzen. Es sind das α-Hygrin $C_8H_{15}NO$, das höchstwahrscheinlich als 1-Methyl-2-acetonylpyrrolidin anzusprechen ist, das wenig bekannte β-Hygrin $C_{14}H_{24}N_2O$ und endlich das Cuskhygrin, das in naher Beziehung zum α-Hygrin steht

```
CH2—CH2
 |    |
CH2  CH.CH2COCH3
  \  /
   N
   |
  CH3
```

Hygrin

```
CH2—CH2                       CH2—CH2
 |    |                         |    |
CH2  CH—CH2CO—CH2CH            CH2
  \  /                  \  /
   N                     N
   |                     |
  CH3                   CH3
```

Cuskhygrin.

4. Strychnosbasen. In verschiedenen Arten der Gattung Strychnos finden sich zwei nahe verwandte Alkaloide vor, das Strychnin und das Brucin, die 1818 und 1819 von den französischen Forschern Pelletier und Caventou aufgefunden wurden. So enthalten die Samen der Ignatiusbohne von Strychnos Ignatii 1,5% Strychnin neben 0,5% Brucin, die Samen von Strychnos nux vomica 0,4 bis 1,9 % Strychnin und etwa 0,7 bis 1,5 % Brucin. Auch in der Rinde dieser Pflanze, der „falschen Angosturarinde“, finden sich beide Alkaloide. Fast nur Strychnin findet sich in den Samen und der Wurzel von Strychnos Tieuté und ebenfalls nur Strychnin enthält die Wurzel von Strychnos Icaja. Auch andere Strychnos-Arten führen diese Alkaloide. In den Drogen sind die Alkaloide als chlorogensaure Salze enthalten. Die Chlorogensäure, die Igasursäure Pelletiers, zerfällt bei der Hydrolyse in Chinasäure und Kaffesäure (= 3.4-Dioxyzimtsäure).

Trotzdem die beiden Alkaloide sehr lange bekannt sind, ist ihre Konstitution noch recht wenig erforscht.

Das Strychnin besitzt die empirische Formel $C_{21}H_{22}N_2O_2$, das Brucin ist nach $C_{23}H_{26}N_2O_4$ zusammengesetzt, enthält also 2 C-Atome, 4 H-Atome und 2 O-Atome mehr als das Strychnin. Das deutet schon darauf hin, daß sich das Brucin von dem Strychnin nur dadurch unterscheidet, daß in ihm zwei Wasserstoffatome des Strychnins durch Methoxylgruppen ersetzt sind. In der Tat hat man nach der Methode von Zeisel zwei Methoxylgruppen im Brucin nachweisen können. Mit der Auffassung des Brucins als Dimethoxystrychnin stehen auch die sonstigen Eigenschaften des Brucins im Einklange, so daß im allgemeinen das, was über die Konstitution des Strychnins zu sagen ist, auch für die des Brucins gilt.

Durch Destillation des Strychnins mit Zinkstaub, dann mit ätzenden Alkalien und mit Kalk erhält man aus dem Strychnin eine Reihe von Produkten bekannter Konstitution, so hat man in geringer Menge darin β-Methylpyridin, Skatol, Carbazol und Aethylamin nachgewiesen, ihre Menge ist aber so gering, daß man aus ihnen hinsichtlich des dem Strychnin zugrunde liegenden Ringsystems keine sicheren Schlüsse ziehen kann.

Das Strychnin ist trotz seiner zwei tertiär gebundenen Stickstoffatome nur eine einsäurige Base. Mit Wasserstoffsuperoxyd gibt es, wie manche anderen tertiären Amine, ein Oxyd, das Strychninoxyd $C_{21}H_{22}O_3N_2$. Bei der Einwirkung von Schwefeldioxyd und Braunstein liefert es drei isomere Sulfosäuren, die sich durch ihre verschiedene Löslichkeit in Wasser gut voneinander trennen lassen. Ebenso reagiert das Strychnin mit Brom und Chlor unter Bildung einer ganzen Anzahl von Mono- und Polyhalogensubstitutionsprodukten.

Wichtiger sind die Ergebnisse der Oxydationsversuche. Bei der Oxydation von Strychnin mit Kaliumpermanganat in Acetonlösung entsteht eine Säure, welche Leuchs Strychninonsäure nennt

$$\underset{\text{Strychnin}}{C_{21}H_{22}O_2N_2} + 5O = H_2O + \underset{\text{Strychninonsäure}}{C_{21}H_{20}O_6N_2}$$

Die Strychninonsäure ist eine Dikarbonsäure, deren eines Carboxyl durch das basische Stickstoffatom neutralisiert wird, während die andere den stark sauren Charakter der Verbindung verursacht. Die Säure gibt deshalb zwei Arten von Estern: neutrale Monoester und basische Diester, die mit Säuren Salze bilden. Die Strychninonsäure enthält eine Ketogruppe, denn sie gibt ein Oxim und ein Semikarbazon. Diese Ketogruppe ist wahrscheinlich durch die Oxydation einer im Strychnin vorhandenen sekundären Alkoholgruppe entstanden (Leuchs).

Bei der Reduktion gibt die Strychninonsäure eine Alkoholsäure, die Strychninolsäure, die mit verdünntem Alkali schon in der Kälte in Glykolsäure und eine neutrale Substanz, das Strychninolon, zerfällt

$$\underset{\text{Strychninolsäure}}{C_{21}H_{22}O_6N_2} + H_2O = \underset{\text{Glykolsäure}}{C_2H_4O_3} + \underset{\text{Strychninolon}}{C_{19}H_{18}O_3N} + H_2O$$

Die weitere Untersuchung des Strychninolons steht noch aus.

Beim Erhitzen mit alkoholischem Kali liefert das Strychnin unter Wasseraufnahme die Strychninsäure oder ihre Salze

$$\underset{\text{Strychnin}}{C_{21}H_{22}O_2N_2} + H_2O = \underset{\text{Strychninsäure.}}{C_{21}H_{24}O_3N_2}$$

Die Strychninsäure ist eine sehr schwache Säure, deren saure Eigenschaften durch die Anwesenheit einer Imidogruppe im Molekül stark abgeschwächt sind. Tafel erklärt den Uebergang des Strychnins in die Strychninsäure so, daß im Strychnin eine $\begin{array}{l}-CO\\ \mid\\ =N\end{array}$ Gruppe vorhanden ist, die durch Wasseraufnahme in die Gruppe $\begin{array}{l}-COOH\\ \cdot\\ =NH\end{array}$ übergeht. Das Vorhandensein dieser Gruppe ist von Tafel durch die Darstellung einer ganzen Reihe von Derivaten bestätigt worden. Das Strychnin erscheint demnach als ein cyklisches Säureamid. Diese Konstitution erklärt auch die indifferenten Eigenschaften des in dieser Gruppe vorhandenen Stickstoffatoms. Die basischen Eigenschaften des Strychnins sind lediglich dem zweiten Stickstoffatom zu verdanken. Auch die Funktion des einen Sauerstoffatomes wird durch die Bildung der Strychninsäure erklärt,

das zweite Sauerstoffatom ist, wie schon oben bemerkt wurde, als sekundäre Alkoholgruppe vorhanden.

Wichtig ist auch das Verhalten des Strychnins gegen Salpetersäure, da aus den Reaktionsprodukten, die dabei entstehen, hervorzugehen scheint, daß im Strychnin ein Chinolin- oder Tetrahydrochinolinring vorhanden ist. Beim Kochen von Strychnin mit 20 % Salpetersäure entsteht nämlich neben Pikrin- und Oxalsäure eine einbasische Säure, die Dinitrostrycholkarbonsäure $C_9H_2N.(NO_2)_2(OH)_2COOH$. Beim Erhitzen mit Wasser zerfällt diese Säure unter CO_2-Abspaltung in das Dinitrostrychol, $C_9H_3N.(NO_2)_2(OH)_2$, das Tafel als ein Dinitrodioxychinolin bezeichnet. Tafel führt noch eine ganze Reihe von Gründen an, die dafür sprechen, daß im Strychnin ein Tetrahydrochinolinring enthalten sei. Bekannte Chinolinderivate hat man aber bisher bei der Untersuchung des Strychnins noch nicht gefunden.

W. H. Perkin jun. hat vor kurzer Zeit folgende Formeln aufgestellt

```
   H     H2
   C     C          CH
 /   \ /   \      /    \
HC     C     CH        CH
|      ||    |         |
HC     C     C         CH       CH2
  \   /  \  /   \    /    \   /     \
   C      N       C        CH        CH2
   H      |       |        |         |
          CO2     N   —    CH        CH2
             \   /           \
              CH2            CHOH
```

Strychnin

```
 OCH3  H2        H
   C    C        C
 //  \ /  \  H /   \
CH     C     C       CH
|      ||    |       |
HC     C     C       CH       CH2
  \   /  \  /   \   /    \   /    \
   C      N       C       CH       CH2
   |      |       |       |        |
 OCH3     CO      N   —   CH       CH2
             \   /
              CH2          CHOH
```

Brucin

Bei dem verhältnismäßig geringen Einblick, den wir bisher in die Konstitution der beiden Basen haben, erscheint allerdings die Aufstellung dieser Formeln etwas verfrüht.

Sowohl das Strychnin als das Brucin geben charakteristische Farbenreaktionen. Uebergießt man eine Spur Strychnin mit konzentrierter Schwefelsäure, so löst es sich farblos auf. Gibt man dann in die Lösung ein Körnchen Kaliumbichromat, so entsteht vom Kristall ausgehend eine blauviolette Färbung, die sich in Schlieren durch die Flüssigkeit zieht. Nach einiger Zeit geht die Färbung in Rot über. Das Brucin löst sich in konzentrierter Salpetersäure mit blutroter Farbe, die allmählich in gelb übergeht. Beim Zusatz von Zinnchlorürlösung tritt dann eine violette Färbung auf.

Das Strychnin bildet rhombische Kristalle Fp. 268 °. Es ist linksdrehend, in Wasser fast unlöslich, leichter löslich in organischen Lösungsmitteln außer Petroläther und Aether. Der intensiv bittere Geschmack ist noch in einer Lösung 1: 60 000 wahrnehmbar.

Das Brucin bildet kleine Kriställchen, die gewöhnlich 4 Mol. Kristallwasser enthalten. Wasserfrei schmilzt es bei 178 °. Es schmeckt ebenfalls intensiv bitter und ist in Wasser schwer löslich, aber immerhin etwas mehr als das Strychnin.

5. Curare. Aus der Rinde verschiedener Strychnosarten wird in Südamerika eine als Pfeilgift benutzte Substanz, das Curare oder Urari dargestellt.

Man unterscheidet als Handelssorten das Tubocurare, das vielleicht aus Strychnos Gubleri gewonnen wird, das Calebassencurare von Strychnos toxifera und das Topfcurare aus Strychnos Castelnaea. Die Bezeichnung der Sorten rührt von ihrer Verpackung her. Zurzeit kommt fast nur das Tubencurare in den Handel, in dem Böhm zwei Alkaloide nachgewiesen hat.

Das Curin $C_{18}H_{19}NO_3$ ist eine kristallisierte tertiäre Base, deren Salze linksdrehend sind.

Viel giftiger ist das zweite Alkaloid, das Tubocurarin $C_{19}H_{22}NO_4OH$, das eine Ammoniumbase darstellt. Es ist eine braunrote amorphe Masse. Sein salzsaures Salz dürfte in der Regel das Curarin des Handels sein.

6. Chinabasen. Eine große Anzahl von Alkaloiden findet sich in den Rinden verschiedener Cinchonaarten, baum- oder strauchartiger Pflanzen, welche in Zentral- und Südamerika einheimisch sind, jetzt aber auch auf Java und in Ostindien in großem Maßstabe kultiviert werden. Einige Wichtigkeit besitzen ferner die Pflanzungen auf Jamaika, in geringerem Maße werden Cinchonaarten auch in Deutsch-Afrika u. a. angebaut. Kultiviert wird von den verschiedenen Cinchonaarten hauptsächlich Cinchona calisaya Ledgeriana How. und ihre zahlreichen Varietäten und Bastarde, welche die sogenannten Königschinarinden liefern, ferner Cinchona succirubra Pavon, von der die rote offizinelle Rinde stammt. Die aus Südamerika ausgeführten Rinden stammen teils von diesen, teils von einer Reihe anderer Cinchonaarten. Auch andere den Cinchonaarten verwandte Pflanzen, so solche der Gattung Remijia und Laden-

bergia, enthalten echte Chinaalkaloide oder diesen sehr nahe stehende Basen.

In diesen Rinden sind eine recht große Anzahl (21) von Alkaloiden vorhanden, doch enthält nicht jede Chinarinde die Gesamtzahl derselben. Auch die Quantität der Alkaloide schwankt sehr; im allgemeinen enthalten jetzt die kultivierten Arten weit mehr Alkaloide, als die aus Amerika ausgeführten wilden Arten, ein Erfolg, welcher der sorgfältigen Auslese des angebauten Materiales zu danken ist. Derartige Rinden enthalten bis zu 10 und mehr Prozent Alkaloide.

Bisher sind in den verschiedenen Chinarinden folgende gut charakterisierte Alkaloide aufgefunden worden:

Cinchonin, Cinchonidin $C_{19}H_{21}N_2(OH)$
Hydrocinchonin = Cinchotin, Cinchamidin, Cinchonamin $C_{19}H_{23}N_2(OH)$
Cuprein $C_{19}H_{20}N_2(OH)_2$
Chinamin, Conchinamin $C_{19}H_{24}N_2O_2$
Chinin, Chinidin = Conchinin $C_{19}H_{20}N_2(OH)(OCH_3)$
Hydrochinin, Hydrochinidin $C_{20}H_{26}N_2O_2$
Chairamin, Chairamidin, Conchairamin, Conchairamidin $C_{22}H_{26}N_2O_4$
Concusconin, Cusconin, Aricin $C_{23}H_{26}N_2O_4$
Homochinin $C_{39}H_{46}N_4O_4$
Dicinchonin $C_{40}H_{46}N_4O_3$.

Außerdem finden sich noch einige wenig bekannte und zum Teil zweifelhafte Basen vor, wie das Paricin, Javanin, Cusconidin, Cuscamin und Cuscamidin.

In der Rinde sind diese Basen als Salze der Chinasäure, Chinagerbsäure und Chinovasäure enthalten.

Das weitaus wichtigste der Chinaalkaloide ist das 1820 von Pelletier und Caventou entdeckte Chinin, das auch die Hauptmenge des Alkaloidgehaltes der kultivierten Rinden ausmacht, den kleineren Teil bildet das ebenfalls 1820 von den gleichen Forschern aufgefundene Cinchonin; die übrigen Alkaloide treten in der Regel den beiden Hauptalkaloiden gegenüber an Menge zurück.

Diese beiden wichtigsten Alkaloide sind natürlich auch am besten untersucht worden und dabei stellte es sich heraus, daß sie in ihrer Konstitution einander sehr nahe stehen, so zwar, daß man viele Resultate, die man bei der Untersuchung des einen Alkaloides erhielt, ohne weiteres auch auf das andere übertragen konnte.

Die ersten hierher gehörigen Beobachtungen rühren von Gerhard 1847 her, der bei der Kalischmelze des Cinchonins das Chinolin erhielt. Bei derselben Reaktion fanden 1879 Butlerow und Wischnegradski neben dem Chinolin das β-Aethylpyridin auf. Weiter hat man dann noch das γ-Methylchinolin, das Lepidin, bei den Produkten der Kalischmelze gefunden. Ganz analog diesen aus Cinchonin gewonnenen Stoffen erhielt 1880 Skraup aus der Kalischmelze des Chinins das p-Methoxychinolin und das p-Methoxylepidin.

Aehnliche Resultate ergaben sich bei der Untersuchung der Oxydationsprodukte der Chinaalkaloide. Durch Oxydation des Cinchonins mit Chromsäure hatte Weidel 1879 die Cinchoninsäure C_9H_6NCOOH erhalten, die dann von Skraup und von Koenigs als γ-Chinolinkarbonsäure erkannt wurde. Analog gab das Chinin p-Methoxychinolin-γ-karbonsäure, die sogenannte Chininsäure. In den Mutterlaugen dieser Oxydationen hat man dann später u. a. das wichtige Merochinen und die Cincholoiponsäure aufgefunden.

Durch diese Untersuchungen, besonders durch die Isolierung der Cinchoninsäure und der Chininsäure war nachgewiesen worden, daß dem Cinchonin ein Chinolinkern, dem Chinin ein p-Methoxychinolinkern zugrunde liege.

Man bezeichnet gewöhnlich den Chinolin- und den p-Methoxychinolinrest als die erste Hälfte der Chinabasen und den mit dem γ-Kohlenstoffatom der ersten Hälfte verbundenen Rest $C_{10}H_{16}NO$, der bei beiden Basen der gleiche ist, als zweite Hälfte derselben. Danach kann man die Formeln der beiden Alkaloide folgendermaßen auflösen

$$\begin{array}{l}C_9H_6N\\ |\\ C_{10}H_{16}NO\end{array}\ \text{Cinchonin}\qquad \begin{array}{l}C_9H_5(OCH_3)N\\ |\\ C_{10}H_{16}NO\end{array}\ \text{Chinin.}$$

Die Konstitutionsermittelung der zweiten Hälfte der Chinabasen hat wesentlich größere Schwierigkeiten gemacht, als die der ersten. Skraup und Konek haben auf einem interessanten aber verwickelten Wege festgestellt, daß auch das Stickstoffatom der zweiten Hälfte tertiär gebunden ist. Bei diesen Untersuchungen hat sich ferner ergeben, daß die zweite Hälfte stärker basisch ist als der Chinolinrest, da sich bei den freien Chinabasen die Säure an die zweite Hälfte anlagert, wenn nur 1 Aequivalent Säure zur Base gegeben wird.

Weiter haben dann Koenigs und auch Skraup den Nachweis geführt, daß in

der zweiten Hälfte der Chinaalkaloide eine Vinylgruppe — $CH=CH_2$ vorhanden ist. 1894 gelang es dann K o e n i g s, aus den Produkten der Oxydation des Cinchonins mit Chromsäure das wichtige Merochinen zu isolieren. Das Merochinen enthält noch die Vinylgruppe, bei der Oxydation geht es in die Cincholoiponsäure über, welche S k r a u p ebenfalls bei der Oxydation von Cinchonin mit Chromsäure erhalten hatte.

Beide Forscher haben dann durch ausgedehnte Untersuchungen die Konstitution der Cincholoiponsäure aufgeklärt

```
      CH2—CH2
     /        \
HN              CH—CH2—COOH
     \        /
      CH2—CH—COOH
```

Cincholoiponsäure.

Für das Merochinen folgt daraus die Formel:

```
      CH2—CH2
     /        \
HN              CH—CH2—COOH
     \        /
      CH2—CH—CH=CH2
```

Merochinen.

Das Merochinen ist also eine Karbonsäure des β-Vinyl-γ-methylpiperidins.

Aus dem gleichzeitigen Entstehen von Cinchoninsäure und Merochinen bei der Oxydation des Cinchonins ergibt sich, daß die beiden Kohlenstoffatome, welche in den beiden Verbindungen als Carboxylgruppen erscheinen, auch die Verknüpfung der beiden Hälften des Alkaloides vermitteln. Von diesen beiden C-Atomen wußte man bereits, daß das eine mit einer Hydroxylgruppe, wie sich später ergab, einer sekundären, verbunden war.

Bei der Ausmittelung der Art der Verknüpfung der beiden Kohlenstoffatome lag eine besondere Schwierigkeit darin, daß es zunächst unklar war, wie aus einem tertiär gebundenen Stickstoffatom, wie es in der zweiten Hälfte der Chinabasen vorliegt, durch Oxydation das sekundäre Stickstoffatom des Merochinens entstehen konnte.

Diese Schwierigkeit wurde durch die Untersuchungen von v. M i l l e r und R h o d e über das Cinchotoxin überwunden. Diese fanden nämlich, daß das Cinchonin beim Kochen mit verdünnter Essigsäure ohne Aenderung der Bruttoformel eine Umlagerung erleidet. Es entsteht dabei unter Sprengung einer Stickstoffkohlenstoffbindung eine Ketogruppe und gleichzeitig geht das tertiäre Stickstoffatom des Cinchonins in das sekundäre des Cinchotoxins über; es wurde also bei dieser Umlagerung ein Ring aufgesprengt, der der zweiten Hälfte angehört.

Wendet man die Ergebnisse dieser Untersuchungen auf die Oxydationsprodukte des Cinchonins an, so klärt sich der Reaktionsverlauf dahin auf, daß ein Kohlenstoffatom, welches das alkoholische Hydroxyl trägt und eines, das an den Stickstoff der zweiten Hälfte gebunden ist, zum Carboxyl der Cinchoninsäure und des Merochinens oxydiert wird.

K o e n i g s stellte daraufhin für das Cinchonin folgende Formel auf:

```
       H
       C     C     —CH2—C—N—CH2
     //  α \ /  \        /  |   |
HCp        C     CH   HO   |  CH2  |
  |        ||    |         |   |   |
HCm        C     CH        |  CH2  |
     \ o  / \   //         |   |   |
       C     N          H2C—CH—CH—CH=CH2
       H
```

Cinchonin nach K o e n i g s.

Ersetzt man das im Chinolinrest in p-Stellung befindliche Wasserstoffatom durch den Methoxylrest, so hat man die Chininformel von K o e n i g s.

Diese von K o e n i g s aufgestellten Formeln müssen aber infolge der Arbeiten von P. R a b e etwas abgeändert werden. Durch gemäßigte Oxydation mit CrO_3 gelang es diesem Forscher nämlich aus dem Chinin ein Keton $C_{20}H_{22}N_2O_2$, das Chininon zu erhalten, das sich vom Chinin nur durch einen Mindergehalt von 2 H-Atomen unterscheidet. Es mußte demnach im Chinin nicht, wie es die Formel von K o e n i g s verlangt, eine tertiäre, sondern eine sekundäre Hydroxylgruppe vorhanden sein.

Behandelt man das so erhaltene Keton mit salpetriger Säure, so bildet sich ein Isonitrosoderivat, dabei zerfällt aber das Molekül in zwei Stücke. Das eine Spaltstück ist die schon lange bekannte Chininsäure von Skraup, = p-Methoxy-γ-chinolinkarbonsäure, das andere besitzt die Formel $C_9H_{14}ON_2$ und zeigt gleichzeitig basische und saure Eigenschaften. Es enthält das tertiäre Stickstoffatom der zweiten Hälfte der Chinabasen noch unverändert. Bei der Hydrolyse zerfällt es in Hydroxylamin und Merochinen

$$C_9H_{14}ON_2 + 2H_2O = \underset{\text{Hydroxylamin}}{NH_2OH} + \underset{\text{Merochinen.}}{C_9H_{15}O_2N}$$

Nach dieser Spaltung kommt dem Isonitrosoderivat folgende Konstitution zu, nach der es nach dem Vorgange von Koenigs, der das eigentümliche Ringsystem $C_7H_{13}N$ als Chinuclidin bezeichnet, als α-Oximido-β-vinylchinuclidin zu betrachten wäre

```
CH2 — CH — CH2
       |
      CH2
       |              Chinuclidin
      CH2
       |
CH2 —  N  — CH2
```

$$\begin{array}{l} CH_2 = CH - CH - CH - CH_2 \\ \qquad\qquad\qquad\quad | \\ \qquad\qquad\qquad CH_2 \\ \qquad\qquad\qquad\quad | \\ \qquad\qquad\qquad CH_2 \\ \qquad\qquad\qquad\quad | \\ \qquad\qquad CH_2 - N - C = NOH \end{array}$$

α Oximido-β vinyl-chinuclidin

Aus der glatten Bildung dieses Isonitrosoderivates aus dem Chininon folgt für dieses nachstehende Formel:

$$\begin{array}{l} \quad\; /CH\backslash \;/C\backslash - CO - CH - N - CH_2 \\ CH_3OC \quad C \quad CH \qquad CH_2 \\ \;\; | \qquad \| \qquad\qquad\quad | \\ H.C \quad C \quad CH \qquad CH_2 \\ \;\; \backslash CH/ \backslash N/ \qquad\quad | \\ \qquad\qquad\qquad CH_2 - CH - CH - CH = CH_2 \end{array}$$

Chininon

für das Chinin folgt daraus:

$$\begin{array}{l} \quad\; /CH\backslash \;/C\backslash - \overset{*}{C}HOH - \overset{*}{C}H - N - CH_2 \\ CH_3OC \quad C \quad CH \qquad\qquad CH_2 \\ \;\; | \qquad \| \qquad\qquad\qquad\quad | \\ H-C \quad C \quad CH \qquad\qquad CH_2 \\ \;\; \backslash C / \backslash N/ \qquad\qquad\quad | \\ \quad\; H \qquad\qquad\quad CH_2 - \underset{*}{C}H - \underset{*}{C}H\,CH = CH_2 \end{array}$$

Chinin

Durch diese Arbeiten ist die Konstitution des Chinins und Cinchonins im wesentlichen aufgeklärt.

Die Synthese der Chinabasen ist einerseits durch den von K o e n i g s bewirkten Aufbau von Chinuclidinderivaten, andererseits durch die von R a b e bewirkte Zurückverwandlung des Cinchotoxins in Cinchonin in Angriff genommen worden.

Die mit einem * versehenen C-Atome des Chinins sind asymmetrisch, es sind deshalb theoretisch 16 isomere Formen des Chinins möglich. P. R a b e ist mit der Ermittelung der Funktion dieser verschiedenen C-Atome beschäftigt.

Cinchonin und Cinchonidin sind stereoisomer; bei vorsichtiger Oxydation liefern beide Alkaloide dasselbe Keton, das Cinchoninon. Ebenso entsteht das gleiche Keton, das Chininon sowohl aus dem Chinin, als dem Chinidin; auch diese beiden Alkaloide sind stereoisomer. Ferner steht das Cinchotin (= Hydrocinchonin) zum Cinchonin in dem einfachen Verhältnisse, daß in ihm in der zweiten Hälfte des Moleküls statt der Vinylgruppe eine Aethylgruppe vorhanden ist. Das Cuprein leitet sich vom Chinin dadurch ab, daß die Methoxylgruppe des Chinins in ihm durch die Hydroxylgruppe ersetzt ist, denn durch Methylieren des Cupreins erhält man Chinin. Die übrigen Chinaalkaloide sind ihrer Konstitution nach noch nicht sicher erforscht.

C h i n i n. Die Darstellung des Chinins erfolgt im Großbetriebe nach Verfahren, deren Einzelheiten geheim gehalten werden. Meist wird man dabei wohl eine Arbeitsweise einhalten, wie sie nachstehend kurz geschildert ist.

Man versetzt die gepulverten Chinarinden mit Kalkbrei, um die Basen in Freiheit zu setzen und zieht dann in geeigneten Apparaten das Gemisch mit erwärmtem Paraffinöl, Petroleumdestillaten oder ähnlichen Lösungsmitteln aus. Durch Ausschütteln mit verdünnter heißer Schwefelsäure entzieht man dann dem Extraktionsmittel die Alkaloide.

Die Lösung der so erhaltenen Sulfate wird heiß mit Soda neutralisiert, beim Erkalten kristallisiert dann die Hauptmenge des Chinins als neutrales (basisches) Chininsulfat aus. Durch mehrfaches Umkristallisieren wird das rohe Sulfat gereinigt, die Hauptmenge der Nebenbasen bleibt in den Mutterlaugen zurück, aus denen diese Körper eventuell gewonnen werden können. Das gereinigte Chininsulfat, auch das offizinelle Salz, enthält noch bis zu 1 % der Nebenalkaloide, besonders Hydrochinin und Cinchonidin. Ganz reine Chininsalze stellt man über das gut kristallisierende Bisulfat $C_{20}H_{24}O_2N_2.H_2SO_4 + 7H_2O$ her.

Das freie Chinin bildet im wasserfreien Zustande Nadeln vom Fp. 174—175°, es zeigt in absolut alkoholischer Lösung $[\alpha]_D^{15}$ — 158,2 (c = 0,2136 bei 15°).

Das Chinin bildet als zweisäurige Base zwei Reihen von Salzen, die gewöhnlichen basischen Salze, die aber neutral reagieren, und die neutralen mit zwei Aequivalenten Säure, die saure Reaktion zeigen.

Wichtig sind von den Salzen das Sulfat $(C_{20}H_{24}O_2N_2)_2.H_2SO_4 + 8H_2O$ und das salzsaure Salz $C_{20}H_{24}O_2N_2.HCl + 2H_2O$. Das Chininsulfat bildet feine weiße leicht verwitternde Nädelchen, die sich bei 15°

in 800 Teilen Wasser lösen. Wird die wässerige Lösung dieses Salzes mit Schwefelsäure oder anderen sauerstoffhaltigen Säuren versetzt, so tritt eine schön blaue Fluoreszenz auf, die noch bei einer Verdünnung 1: 100 000 sichtbar ist. Halogenwasserstoffsäuren verhindern das Auftreten der Fluoreszenz.

Das salzsaure Chinin bildet weiße nadelförmige Kristalle, die sich bei 15 ° in 34 Teilen Wasser lösen und, ebenso wie alle löslichen Chininsalze, stark bitter schmecken. Die wässerige Lösung dieses Salzes fluoresziert nicht.

Das Chinin und seine Salze zeigen eine sehr charakteristische Reaktion. Gibt man zu einer wässerigen Chininlösung etwas Chlor oder Bromwasser und übersättigt mit Ammoniak, so tritt eine schön grüne Färbung auf, die beim Schütteln mit Chloroform in dieses übergeht. Diese Reaktion die sogenannte Thalleiochinreaktion, ist nach Fühner an die Gegenwart des p-Oxychinolinrestes geknüpft. Demgemäß geben auch das Chinidin und das Cuprein diese Probe, während sie dem Cinchonin und Cinchonidin, welche sich vom Chinolin ableiten, fehlt.

Versetzt man die schwefelsaure Lösung eines Chininsalzes mit Jodjodwasserstoff, so scheidet sich der sogenannte Herapathit aus. Diese Verbindung $(C_{20}H_{24}O_2N_2)_4 . 3H_2SO_4 . 2HJ . J_4$ bildet aus Alkohol umkristallisiert metallglänzende Blättchen, die im durchfallenden Licht olivgrün, im reflektierten kantharidengrün erscheinen und das Licht fünfmal stärker als Turmalin polarisieren. Wegen seiner schweren Löslichkeit dient der Herapathit zuweilen zur quantitativen Bestimmung des Chinins.

Cinchonin. Das Cinchonin ist in den Mutterlaugen der Chininfabrikation enthalten. Es wird aus diesen durch Alkalizusatz abgeschieden und durch mehrfache Kristallisation aus Alkohol, in dem es schwer löslich ist, rein erhalten.

Das Cinchonin bildet Nadeln vom Fp. 255,4 °. Das Cinchonin ist rechtsdrehend $[\alpha]_D = + 233,3$ in absolut alkoholischer Lösung (0,1—0,15 g in 20 ccm). Es gibt nicht die Thalleiochinreaktion, wohl aber eine der Herapathitprobe ähnliche Reaktion mit Jodjodwasserstoff.

7. Opiumalkaloide. Das Opium, der eingetrocknete Milchsaft der unreifen Früchte von *Papaver somniferum* L. enthält eine große Anzahl von Alkaloiden. Bisher sind in den verschiedenen Opiumsorten folgende Basen mit einiger Sicherheit nachgewiesen worden:

Hydrokotarnin $C_{12}H_{15}NO_3$ (Hesse 1871)
Codamin $C_{20}H_{25}NO_4$ (Hesse 1870)
Codein $C_{18}H_{21}NO_3$ (Robiquet 1832)
Kryptopin $C_{21}H_{23}NO_5$ (T. u. H. Smith 1864)
Lanthopin $C_{23}H_{25}NO_4$ (Hesse 1870)
Laudanin $C_{20}H_{25}NO_4$ (Hesse 1870)
Laudanidin $C_{20}H_{25}NO_4$ (Hesse 1894)
Laudanosin $C_{21}H_{27}NO_4$ (Hesse 1871)
Mekonidin $C_{21}H_{23}NO_4$ (Hesse 1870)
Morphin $C_{17}H_{19}NO_3$ (Sertürner 1817)
Narcein $C_{23}H_{27}NO_8 + 3H_2O$ (Pelletier 1835)
Narkotin $C_{22}H_{23}NO_7$ (Derosne 1803)
(rac. Narkotin = Gnoskopin).
Oxydimorphin = } $C_{34}H_{36}N_2O_6$
Pseudomorphin } (Pelletier 1835)
Oxynarkotin $C_{22}H_{23}NO_8$ (Beckett und Wright 1875)
Papaveramin $C_{21}H_{25}NO_6$ (Hesse 1888)
Papaverin $C_{20}H_{21}NO_4$ (Merck 1848)
Protopin = } $C_{20}H_{19}NO_5$ (Hesse 1871)
Macleyin }
Pseudopapaverin $C_{21}H_{21}NO_4$ (Hesse 1888)
Rhoeadin $C_{21}H_{21}NO_6$ (Hesse 1865)
Thebain $C_{19}H_{21}NO_3$ (Thiboumery 1835)
Tritopin $C_{42}H_{54}N_2O_7$ (Kauder)
Xanthalin $C_{37}H_{36}N_2O_9$ (T. u. H. Smith 1893).

Es finden sich aber nicht alle diese Basen in jeder Opiumsorte, sondern die eine oder die andere wird unter Umständen fehlen, außerdem kommen aber einige in so geringer Menge vor, daß ihre Isolierung nur dann möglich ist, wenn die Endlaugen von der Darstellung der Opiumalkaloide im Großbetriebe zur Verfügung stehen.

Die Alkaloide sind im Opium nur zum Teil in freier Form vorhanden (Narkotin), zumeist finden sie sich als schwefel-, milch- und mekonsaure Salze in der Droge vor (Mekonsäure = β-Oxy-γ-pyron-α-α_1-dikarbonsäure).

Die Menge der Alkaloide im Opium ist beträchtlichen Schwankungen unterworfen. Der Morphingehalt wechselt von 3 bis 23 %, im Durchschnitt beträgt er etwa 10 bis 12 %, der Narkotingehalt steigt von 1 bis 10 %, in der Regel sind es 4 bis 6 %. Diesen beiden Hauptalkaloiden gegenüber treten die anderen Opiumbasen an Menge stark zurück: das Papaverin findet sich zu etwa 0,5 bis 1 %, das Kodein zu 0,3 bis 0,8 %, das Thebain zu 0,2 bis 0,5 %; die übrigen sind in noch geringerer Menge vorhanden.

Nach ihrer Konstitution lassen sich die Opiumalkaloide in zwei Gruppen teilen, in solche, die in ihrer Konstitution dem Morphin nahe stehen, es sind das Kodein, Thebain und Oxydimorphin, und solche, welche sich vom Isochinolin ableiten, oder diesem nahe stehen. Von einem Teile der Opiumalkaloide hat man auch noch keine Anhaltspunkte bezüglich ihrer Konstitution.

Narkotin. Von den Isochinolinderivaten ist das wichtigste das Narkotin, das sich im Opium zu 1 bis 10 % findet. Es ist eine schwache Base, deren Salze schon durch Wasser zerlegt werden. Die freie Base selbst ist linksdrehend, ihre Salze drehen rechts. Durch die Arbeiten von

Roser, die von Freund und Becker bestätigt wurden, ist die Konstitution des Narkotins aufgeklärt worden

```
              OCH3
             /
          C<
         /  \
       HC    C  OCH3
       ||    |
       HC    C—C = O
         \C//      |
          |        |
  CH3   CH — O          Narkotin
  O       |
  |
  //C\  /CH\
 /O—C   C      N—CH3
CH2 |   ||     |
 \O—C   C      CH2
   \\C/ \ C /
     H    H2
```

Durch Oxydation zerfällt das Narkotin in Opiansäure und Cotarnin, welch letzteres in Form seines salzsauren Salzes als Stypticin, in Form seines phthalsauren Salzes als Styptol Anwendung findet.

$$C_{22}H_{23}NO_7 + O + H_2O = C_{10}H_{10}O_5 + C_{12}H_{15}NO_4$$
Narkotin — Opiansäure — Cotarnin.

Die Razemform des Narkotins ist nach Rabe identisch mit dem schon lange unter dem Namen Gnoskopin bekannten Opiumalkaloide.

Erhitzt man das Narkotin mit Wasser, so zerfällt es unter Wasseraufnahme in Opiansäure und Hydrocotarnin, eine Base, die sich in geringer Menge auch im Opium findet. Das Hydrocotarnin entsteht auch durch Reduktion des Cotarnins

```
            OCH3
           /
          C     CH2
        // \   /
    O - C    C      N.CH3
   /    |    |
CH2     |    |      |        Hydro-
   \    |    |      |        cotarnin
    O—C      C      CH2
      \\  /   \   /
        CH     CH2
```

Das Hydrocotarnin ist ein echtes Isochinolinderivat, es ist Methoxymethylendioxytetrahydroisochinolin.

Narcein. In naher Beziehung zum Narkotin steht das Narcein $C_{23}H_{27}NO_8 + 3H_2O$, das zu etwa 0,1 % im Opium enthalten ist. Erhitzt man nämlich Narkotinjodmethylat mit Alkali, so erhält man das Narcein

```
                 OCH3
                /
              C
            /   \
        HC        C  OCH3
        |         ||
        HC        C.COOH
                 /
               C
               |
     CH3      CO             Narcein
     O         |
     |         |
     C        CH2
   //  \    /
O—C      C       N /CH3
/                   CH3
CH2    |            |
  \    |            |
   O —C      C      CH2
      \\  /    \   /
        CH      CH2
```

Das Narcein ist kein Isochinolinderivat mehr, sondern enthält den Stickstoff in einer aliphatischen Seitenkette.

Ein anderes wichtiges Isochinolinderivat ist weiter das Papaverin, das nächst Morphin und Narkotin das häufigste Opiumalkaloid ist, das in manchen ostindischen Opiumsorten allerdings fehlt. Das Papaverin bildet Prismen von Fp. 147 °.

Durch die Arbeiten von Goldschmiedt ist die Konstitution des Papaverins klar gelegt worden; die von Pictet ausgeführte Synthese hat die Richtigkeit der Goldschmiedtschen Formel bestätigt

```
       C——CH2——C        CH
     //  \      // \   /  \\
   HC     CH   N     C      C—OCH3
   |      ||   |     ||     |
CH3OC     CH   HC    C      C—OCH3
     \\  /       \\ /  \   //
       C           C     C
       |           H     H
      OCH3
```

Danach ist das Papaverin ein Tetramethoxybenzylisochinolin.

Als Papaverinderivat ist dann das seltene Opiumalkaloid Laudanosin zu betrachten, das zwar im Opium nur in verschwindender Menge vorkommt, aber deshalb interessant ist, weil es das erste Opiumalkaloid war, dessen Synthese gelungen ist (Pictet)

```
                               H
       C——CH2——CH              C
     //  \      /  \   /         \\
   HC     CH  CH3N     C          C—OCH
   |      ||    |      |          |
CH3OC     CH   H2C     C          C—OCH3
     \\  /       \   /   \      /
       C           C       C
      /            H2      H
CH3O          Laudanosin
```

Das Laudanosin ist d-n-Methyltetrahydropapaverin.

Nahe verwandt mit dem Laudanosin sind das Laudanin und das Laudanidin, die sich von jenem nur dadurch unterscheiden, daß in ihnen eine Methoxylgruppe des Laudanosins durch die Hydroxylgruppe ersetzt ist.

Von wesentlich größerer praktischer Bedeutung, als die bisher behandelten Alkaloide, sind die Alkaloide der Morphingruppe, vor allem dieses selbst.

Die Zahl der Arbeiten, die sich mit der Konstitution des Morphins befassen, ist sehr groß; von vielen Irrwegen abgesehen, welche die Forschung gerade auf diesem schwierigen Gebiete eingeschlagen hat, hat sich die Konstitutionsermittelung des Morphins kurz etwa folgendermaßen gestaltet:

Das Morphin ist eine tertiäre Base, gleichzeitig ist es aber auch ein einatomiges Phenol, denn es löst sich in Aetzalkalien zu Salzen, die schon durch die Kohlensäure der Luft wieder zersetzt werden. Durch Alkylieren geht die Phenolhydroxylgruppe leicht in die Alkoxylgruppe über (Methyläther = Codein, Aethyläther = Dionin). Andererseits liefert das Morphin leicht Diacetyl- und Dibenzoylverbindungen. Daraus geht hervor, daß in ihm außer dem Phenolhydroxyl noch ein alkoholisches vorhanden ist. Das dritte O-Atom des Morphins ist indifferenter Natur.

Als Phenol ist das Morphin gegen oxydierende Mittel sehr empfindlich; einen großen Teil der Untersuchungen über seine Konstitution hat man deshalb mit dem Codein ausgeführt, da dieses, weil in ihm die Phenolgruppe des Morphins durch den Methoxylrest ersetzt ist, gegen Oxydationsmittel weit resistenter ist. Eine gewisse Rolle bei der Konstitutionsermittelung des Morphins haben dann ein anderes Opiumalkaloid, das Thebain und weiter das Apomorphin gespielt. Das Apomorphin entsteht aus dem Morphin durch Erhitzen mit wasserentziehenden Mitteln bei höherer Temperatur

$$\underset{\text{Morphin}}{C_{17}H_{19}NO_3} = H_2O + \underset{\text{Apomorphin.}}{C_{17}H_{17}NO_2}$$

Das Thebain ist nach den Untersuchungen von Freund und von Knorr der Methyläther der Enolform des Codeinons. Das Codeinon entsteht seinerseits dadurch aus dem Codein, daß dessen sekundäre Alkoholgruppe zur Ketongruppe oxydiert wird

$$\underset{\text{Codein}}{C_{18}H_{21}O_3N} + O = H_2O + \underset{\text{Codeinon}}{C_{18}H_{19}O_3N}$$

$$\underset{\text{Thebain.}}{C_{18}H_{18}(OCH_3)O_2N}$$

Den ersten tieferen Einblick in die Konstitution des Morphins erhielt man bei der Zinkstaubdestillation desselben. Dabei entsteht u. a. Phenanthren (Vongerichten 1881); es schien also das Alkaloid ein Derivat dieses Kohlenwasserstoffes zu sein.

Auch andere Untersuchungen deuten darauf hin, daß im Morphin ein Phenanthrenrest vorhanden ist. So erhielten Vongerichten und Schrötter durch Erhitzen von Codeinmethylhydroxyd mit Natronlauge eine neue tertiäre Base, das α-Methylmorphimethin, das aus dem Codeinderivat durch Aufspaltung des stickstoffhaltigen Ringes entstanden ist. Es handelt sich also um Abbau durch erschöpfende Methylierung

$$\underset{\text{Codeinmethylhydroxyd}}{OH.(OCH_3).C_{17}H_{17}O\;N\langle{}^{CH_3}_{OH}} =$$

$$H_2O + \underset{\alpha\text{-Methylmorphimethin.}}{OH.(OCH_3).C_{17}H_{16}O = N.CH_3}$$

Das α-Methylmorphimethin zerfällt seinerseits beim Erhitzen mit Salzsäure oder Essigsäureanhydrid in Dimethyloxäthylamin und ein Methoxyoxyphenanthren

$$\underset{\alpha\text{-Methylmorphimethin}}{{}^{OH}_{OCH_3}\rangle C_{17}H_{16}O = N.CH_3}$$

$$= {}^{OH}_{OCH_3}\rangle C_{14}.H_8 + \underset{\text{Dimethyloxaethylamin.}}{{}^{CH_3}_{CH_3}\rangle N.CH_2CH_2OH}$$

Durch eingehende Untersuchungen von Vongerichten und von Pschorr hat sich für dieses Methylmorphol genannte Phenanthrenderivat folgende Konstitution ergeben

```
        H       H
        C       C
      //(1)\  /(10)\\
  HC(2)     C      (9)CH
    |       ||        |
CH3OC(3)    C         C       Methylmorphol
     \\(4)/  \    //  \       = 3-Methoxy-
        C      C   (8)CH     4-oxyphenan-
        |      |       ||       thren.
       OH    HC(5)  (7)CH
                \\(6)/
                  C
                  H
```

Bei der Spaltung des α-Methylmorphimethins mit gasförmiger Salzsäure erhält man statt des Dimethyloxäthylamins ein Gemisch desselben mit Tetramethylaethylendiamin; beide Körper sind aber nicht die primären Produkte der Reaktion, sondern verdanken ihre Entstehung erst einer nach-

träglichen Einwirkung von Natronlauge auf primär gebildetes Chloräthyldimethylamin

$Cl.C_2H_4N\langle {CH_3 \atop CH_3}$ Ferner entsteht durch Spaltung des α- und des später zu erwähnenden β-Methylmorphimethins mit Natriumäthylat neben Methylmorphol Dimethylaminoäthyläther $(CH_3)_2N.C_2H_4.O.C_2H_5$.

Die unter Umständen so leicht eintretende Bildung des Oxäthyldimethylamins und ähnlich nahe verwandter Verbindungen bei der Spaltung des α-Morphimethins und anderer Morphinderivate haben zeitweise zu der Annahme geführt, daß die in dem Morphin enthaltene Gruppe $—CH_2—CH_2—N—CH_3$, aus der das Oxäthyldimethylamin oder dessen Sauerstoffderivate entstehen — man bezeichnet diese Gruppierung als den stickstoffhaltigen Nebenring der Morphinalkaloide — durch Vermittelung von Sauerstoff an den Phenanthrenring geknüpft sei. Aus diesen Erwägungen stellte L. Knorr seine bekannte Oxazinformel für das Morphin auf, eine Formel, die lange Zeit fast unbestritten angenommen war, sich aber schließlich doch als nicht haltbar erwiesen hat.

Wichtig für die Beurteilung der Konstitution des Morphins ist dann noch die Spaltung eines anderen der sechs bekannten Methylmorphimethine, des β-Methylmorphimethins geworden, insofern, als sie über die Rolle des indifferenten Sauerstoffatoms des Morphins Rechenschaft gegeben hat. Das β-Methylmorphimethin entsteht aus der α-Verbindung durch Umlagerung der letzteren mit Hilfe alkoholischer Kalilauge (Knorr und Smiles) oder durch Destillation im Vakuum (Pschorr). Das β-Methylmorphimethin ist optisch isomer mit der α-Verbindung, ist aber nicht der optische Antipode derselben.

Das Methylhydroxyd des β-Methylmorphimethins zerfällt durch Erhitzen auf dem Wasserbade in Aethylen, Trimethylamin, Wasser und den sogenannten Morphenolmethyläther (Vongerichten):

$C_{14}H_9OH(OCH_3)O C_2H_4N.(CH_3)_3OH =$
β-Morphimethinmethylhydroxyd

$C_{14}H_7O(OCH_3) + H_2O + C_2H_4 + N(CH_3)_3$
Morphenol-methyläther — Aethylen — Trimethylamin.

Der Morphenolmethyläther läßt sich leicht in sein zugehöriges Phenol, das Morphenol, überführen. Durch Schmelzen des Morphenols mit Aetzkali erhielten dann Vongerichten und Dittmer das 3-4-5-Trioxyphenanthren. Dem Morphenol kommt also folgende Konstitution zu

```
      HC     CH
    //(1)\ /(10)\\
  HC (2)  C    (9) CH
   |      ||
 HOC (3)  C       C
   \\(4)/ \      // \
      C       C (8) CH
      |       |     ||
      O  ———  C(5)(7)CH
              \\(6)/
                CH
           Morphenol

   CH—CH
   ||   ||
   CH   CH
    \ O /
    Furan
```

```
      CH     CH
    //(1)\ /(10)\\
  HC (2)  C    (9) CH
   |               |
 HOC (3)  C        C
   \\(4)/ \      // \
      C       C  (8)CH
      |       |     ||
     OH   HOC(5)(7)CH
              \\(6)/
                CH
```
3-4-5-Trioxyphenanthren

Es ist sehr wahrscheinlich, daß die in dem Morphenol enthaltene eigentümliche Kombination des Furanringes mit dem Phenanthrenringe schon im Morphin selbst vorhanden ist.

Durch die bis 1907 vorliegenden Untersuchungen war festgestellt, daß das Morphin ein Phenanthrenderivat ist, das sechsfach substituiert und sechsfach hydriert ist. Die Morphinformel ließ sich demnach auflösen in:

$C_{14}H_{14}$ Phenanthrenkern 6fach substituiert u. 6fach hydriert.
- OH Phenolhydroxyl in Stellung 3.
- >O indifferentes Sauerstoffatom verbindet 4 und 5.
- $—CH_2—CH_2—N—CH_3$ Nebenring — Haftstelle des C-Atoms noch unbestimmt, Haftstelle des N-Atoms an der Brücke des Phenanthrenkernes, an 9 oder 10.
- H_2 an der Brücke des Phenanthrenkernes addierter Wasserstoff.
- H_4 an Benzolkern III addierter Wasserstoff.
- —OH Alkoholhydroxyl in Stelle 6.

(Schema: Phenanthrenringe I, II, III mit Stellungen (1)–(10))

R. Pschorr stellte dann mit Rücksicht auf das Apomorphin, für welches er die nachstehende Konstitution bewiesen hatte, folgende „Isochinolinformel" für das Morphin auf:

```
  CH    CH2 H CH3
 //(1)\/(10)    N\
HC(2)  C    (9)C    CH2
 |   I  ||   II       |
HOC(3)  C       C    CH2
  \\(4)/ \     //\  /
    C      C   (8)C
    |      |  III ||
   OH    HC(5)(7)CH
            \\(6)/
              CH
```

Apomorphin nach Pschorr

```
   H      H2    CH3
   C      C   H N
 // (1)\/(10)\    \
HC(2)  C    (9)C    CH2
 |   I  ||   II  |    |
HOC(3)  C       C    CH2
  \\(4)/\     //\   /
    C      C  (8)CH
    |      |  III |
    O — HC(5)(7)CH2
            \(6)/
              C
              |
             HOH
```

Morphin nach Pschorr.

Diese Formel von Pschorr läßt sich jedoch nicht mit den Resultaten vereinigen, welche die späteren Arbeiten von Knorr geliefert haben. Wie oben angeführt wurde, war die Haftstelle des sogenannten Nebenringes noch unbestimmt. Einen Anhaltspunkt für diese Haftstelle hat Knorr bei der Untersuchung der Spaltungsprodukte des Pseudocodeinons erhalten.

Beim Schmelzen von Codein mit Oxalsäure entsteht neben anderen Produkten eine dem Codein isomere Base, die Knorr als Pseudocodein bezeichnet. Das Pseudocodein ist strukturisomer mit dem Codein, es enthält aber noch das gleiche Kohlenstoffstickstoffskelett, wie das Codein, denn es läßt sich in dasselbe Desoxycodein $C_{18}H_{21}O_2N$ überführen, das man auch aus dem Codein erhalten kann.

Bei der Oxydation des Pseudocodeins erhält man ein dem oben erwähnten Codeinon strukturisomeres Keton, das Pseudocodeinon.

Erhitzt man das Jodmethylat des Pseudocodeinons mit Alkohol, so findet eine Spaltung desselben statt in Dimethylamidoäthyläther und ein Methoxydioxyphenanthren, das sich durch Methylieren in das 3-4-8-Trimethoxyphenanthren überführen läßt. Codeinon zerfällt bei analoger Behandlung unter Bildung eines 3-4-6-Trimethoxyphenanthrenderivates.

Das dem Codeinon strukturisomere Pseudocodeinon enthält also den Carbonylsauerstoff in 8-Stellung, und bei der Umwandlung von Codein in Pseudocodein tritt demnach eine Verschiebung des Alkoholhydroxyls von 6 nach 8 ein, ohne daß eine weitere Veränderung des Kohlenstoffstickstoffskeletts stattfindet.

Die Kohlenstoffstickstoffkette des Nebenringes kann also weder im Pseudocodein noch im Codein und Morphin an der Stelle 8 haften im Gegensatz zum Apomorphin, für welches Pschorr diese Haftstelle nachgewiesen hat.

Im Morphin, Codein und im Thebain ist die Stelle 8 nicht besetzt, demnach kann eine Pyridinformel (Isochinolin) für diese Alkaloide nicht in Betracht kommen; sie sind nach einem anderen Typus aufgebaut, als die übrigen Opiumalkaloide, die alle Isochinolinderivate darstellen.

Ferner kann als Haftstelle die Stelle 6 des Phenanthrenkernes nicht in Frage kommen, da dort die sekundäre Alkoholgruppe des Morphins steht, ebenso fällt Stelle 7 weg, weil sich dort eine Methylengruppe befindet. Aus diesen und einigen anderen Gründen kommen Knorr und Hörlein zu folgender Morphinformel, in der noch nur die Stellung des Stickstoffs in Stelle 9 oder 10 und die Lage der Doppelbindung im Kern III unsicher ist

```
                        CH3
    H      H2          /
    C      C         N
 //(1)\/(10)\/        \
HC(2)  C    (9)CH      CH2
 |   I.  |   II.  |
HOC(3)  C       C      CH2   Morphin-
  \\(4)/ \     /\\           formel von
    C     HC (8)CH            Knorr.
    |       | III. |
    O      C(5)(7)CH2
            \(6)/
              C
             / \
            H   OH
```

Im Codein ist die in 3 befindliche Phenolhydroxylgruppe des Morphins durch die Methoxylgruppe ersetzt. Im Thebain befindet sich zwischen den Stellen 6 und 7 außerdem eine Doppelbindung, das dadurch tertiär gewordene Hydroxyl ist ebenfalls durch die Methoxylgruppe ersetzt.

Morphin. Zur Morphingewinnung zieht man das zerschnittene Opium mit Wasser aus. Dadurch gehen alle Opiumalkaloide bis auf den größten Teil des Narkotins in Lösung. Diese neutralisiert man mit Natriumkarbonat und versetzt mit Chlorcalcium. Dadurch fällt die Mekonsäure als Kalksalz aus, die Alkaloide bleiben als Hydrochloride in Lösung. Durch Einengen im Vakuum erhält man einen Kristallbrei, dessen kristallisierter Anteil aus salzsaurem

Morphin und Codein besteht. Die Kristalle trennt man von der Mutterlauge und reinigt sie durch Umkristallisieren. Aus der Lösung der so erhaltenen Hydrochloride fällt man durch Ammoniak das Morphin aus, das Codein, das eine stärkere Base als Ammoniak ist, bleibt in Lösung. Aus den Mutterlaugen kann dann das Codein durch Zusatz von Aetzalkalien gewonnen werden.

Das freie Morphin bildet rhombische Prismen, die 1 Mol. Kristallwasser enthalten Fp. etwa 230°. Das Morphin ist eine starke Base, die mit Säuren neutral reagierende Salze bildet. Die Salze sind ebenso wie die freie Base linksdrehend. Durch überschüssiges Aetzalkali läßt sich das Morphin aus seinen Salzen nicht ausfällen, da das Morphin als Phenol in diesen löslich ist, wohl aber kann man es durch Ammoniak fällen, in dem es schwer löslich ist. Von seinen Salzen ist das salzsaure Salz am wichtigsten: Dieses bildet weiße, in Wasser ziemlich leicht lösliche Kriställchen oder würfelförmige Stücke von mikrokristallinischer Beschaffenheit. Wegen seiner phenolartigen Eigenschaften ist das Morphin sehr leicht oxydabel, seine Lösungen gehen schon durch Oxydation an der Luft in solche des unwirksamen Pseudomorphins $(C_{17}H_{18}O_3N)_2$ über, das auch im Opium selbst schon enthalten ist.

C o d e i n. Das Codein kann, wie oben bei der Darstellung des Morphins angeführt wurde, aus den Mutterlaugen der Morphindarstellung gewonnen werden. Meist wird es jedoch durch Methylieren von Morphin gewonnen, z. B.

$$\underset{\text{Morphin}}{C_{17}H_{17}O(OH)_2N} + KOH + \underset{\text{Methylsulfat}}{SO_2(OCH_3)_2}$$
$$= \underset{\text{Methylschwefels. Kalium.}}{CH_3OSO_3K} + H_2O + \underset{\text{Codein.}}{C_{17}H_{17}O(OH)(OCH_3)}$$

Das freie Codein, wasserfrei Kriställchen vom Fp. 155°, ist eine starke Base, die ebenso wie ihre Salze linksdrehend ist. Das wichtigste Salz ist das Phosphat $C_{18}H_{21}NO_3 \cdot H_3PO_4 + 2H_2O$, weiße bitter schmeckende Kristalle, die in Wasser leicht löslich sind.

8. Leichenalkaloide. Unter Leichenalkaloiden oder Ptomainen im engeren Sinne versteht man die bei der Fäulnis menschlicher oder tierischer Leichen entstehenden Stoffe basischer Natur. Diese von Mikroorganismen erzeugten Produkte können sehr verschiedenartiger Natur sein. In der Regel wird es sich dabei um Abbauprodukte des Eiweißkörpers handeln, aber auch die Cerebroside, Protagon sowie das Lecithin und andere Phosphatide, die bei der Spaltung Cholin liefern, können zur Bildung basischer Fäulnisprodukte Anlaß geben.

So erhielt B r i e g e r z. B. bei der Untersuchung gefaulten Fleisches ein sehr giftiges Produkt, das Neurin = Trimethylvinylammoniumhydroxyd, ein Produkt, das offenbar aus dem Cholin durch Wasserabspaltung entstanden ist (vgl. den Artikel „A m m o n i a k d e r i v a t e“)

$$N(CH_3)_3(CH_2{-}CH_2OH)(OH) = H_2O + N(CH_3)_3(CH{=}CH_2)(OH)$$

Cholin = Trimethyloxäthylammoniumhydroxyd. Neurin = Trimethylvinylammoniumhydroxyd.

Ein weiteres mit dem Cholin in nahem Zusammenhange stehendes basisches Fäulnisprodukt ist das Muskarin, das B r i e g e r aus faulendem Dorschfleisch isoliert hat. Dem Muskarin, das sich auch im Fliegenpilz findet, kommt wahrscheinlich folgende Formel zu, die es als ein Oxydationsprodukt des Cholins erscheinen läßt

$$N{\equiv}(CH_3)_3(CH_2{-}CH(OH)_2)(OH) \qquad \text{Muskarin.}$$

Das Muskarin ist ebenfalls sehr giftig.

Während diese Stoffe aus dem Cholin entstehen, liefern auch die Eiweißspaltungsprodukte ähnliche Körper, so entsteht aus der α-,ε-Diaminocapronsäure, dem Lysin, das Pentamethylendiamin, das Cadaverin B r i e g e r s

$$\underset{\text{Lysin}}{NH_2.(CH_2)_4.CH(NH_2)(COOH)} = CO_2 + \underset{\text{Cadaverin.}}{NH_2(CH_2)_5NH_2}$$

In naher Beziehung zu dem ungiftigen Cadaverin steht eine außerordentlich giftige Substanz, die E. St. F a u s t aus faulender Bierhefe isoliert hat, die sich aber auch bei der Fleischfäulnis bilden soll. Diese Sepsin genannte Base ist nach F a u s t ein Dioxycadaverin folgender Konstitution

$$\underset{\text{Sepsin.}}{NH_2.CH_2.CHOH.CHOH.CH_2.CH_2.NH_2}$$

Das Sepsin geht außerordentlich leicht in das ungiftige Cadaverin über, so schon bei wiederholtem Eindampfen seines Sulfates.

Ein weiteres Diamin, das Tetramethylendiamin oder Putrescin hat ebenfalls B r i e g e r aus Leichen und faulenden Fischen isoliert. Das Putrescin entsteht wahrscheinlich aus dem Argininkomplex der Eiweißstoffe. Das Arginin zerfällt dabei zunächst in Harnstoff und α-,δ-Diaminovaleriansäure, die ihrerseits wieder unter CO_2-Verlust in Putrescin übergeht

$$NH_2.C(=NH)-NH.(CH_2)_3.CH\begin{cases}NH_2\\COOH\end{cases} + H_2O$$
Arginin

$$= CO\begin{cases}NH_2\\NH_2\end{cases} + NH_2.(CH_2)_3.CH\begin{cases}NH_2\\COOH\end{cases}$$
Harnstoff. α-,δ-Diaminovaleriansäure = Ornithin.

$$NH_2.(CH_2)_3.CH\begin{cases}NH_2\\COOH\end{cases} =$$
Ornithin

$$CO_2 + NH_2.(CH_2)_4NH_2$$
Putrescin.

Außer den genannten Verbindungen ist noch eine beträchtliche Zahl basischer Verbindungen teils giftiger, teils ungiftiger Natur aus den Produkten der Fleischfäulnis isoliert worden. Besonders von Brieger und neuerdings von Ackermann sind zahlreiche derartige Körper beschrieben worden, deren Konstitution aber bisher noch nicht aufgeklärt ist.

Auch im normalen und besonders im pathologischen Harne finden sich ptomainähnliche Stoffe vor.

Von gewisser praktischer Bedeutung sind diese Körper besonders deshalb geworden, weil sie als Ammoniakderivate mit vielen der allgemeinen Alkaloidreagentien Niederschläge geben; einige geben auch wohl, besonders im unreinen Zustande, Farbenreaktionen, die eine gewisse Aehnlichkeit mit jenen von wirklichen Alkaloiden zeigen. Infolgedessen hegte man besonders bei dem ersten Bekanntwerden dieser Stoffe die Besorgnis, daß unter Umständen ein Ptomain bei einer gerichtlichen Untersuchung die Gegenwart eines Alkaloides vortäuschen könne.

Indessen haben sich diese Besorgnisse als übertrieben erwiesen, denn einmal zeigt sich diese Aehnlichkeit der Ptomaine mit den Alkaloiden nur in einzelnen, niemals in allen Reaktionen, und zweitens kann durch die physiologische Prüfung immer der Nachweis geführt werden, ob in dem fraglichen Produkte tatsächlich das betreffende Alkaloid vorliegt, oder ob dessen Gegenwart nur durch ein Ptomain vorgetäuscht wurde.

Literatur. *J. Guareschi, Einführung in das Studium der Alkaloide. Deutsch von Kunz-Krause. Berlin 1896. — **Amé Pictet,** Die Pflanzenalkaloide. Deutsch von R. Wolffenstein. Berlin 1900. — **Roscoe-Schorlemmer,** Lehrbuch der organischen Chemie Bd. VI. Bearbeitet von E. Hjett und O. Aschan. Braunschweig 1901. — **E. Winterstein und G. Trier,** Die Alkaloide. Berlin 1910. — Biochemisches Handlexikon. Herausgegeben von E. Abderhalden. Bd. V. Die Pflanzenalkaloide. Bearbeitet von **J. Schmidt.** Berlin 1911.— Ueber weitere Literatur s. Roscoe-Schorlemmer und Abderhalden.*

H. Schulze.

Alkohole.

1. Allgemeines. 1 a) Nomenklatur. Als Alkohole bezeichnet man organische Verbindungen, die sich von den Kohlenwasserstoffen durch Ersatz eines oder mehrerer Wasserstoffatome durch Hydroxylgruppen (OH-) herleiten. Je nach der Anzahl der Hydroxyle unterscheidet man einwertige (einatomige, einsäurige), zweiwertige, dreiwertige Alkohole usw. Die einwertigen gesättigten Alkohole, die sich von den Grenzkohlenwasserstoffen ableiten, heißen auch Grenzalkohole, die einwertigen ungesättigten Alkohole mit Aethylenbindung Olefinalkohole, mit Acetylenbindung Acetylenalkohole. Zweiwertige Alkohole nennt man Glycole nach der einfachsten derartigen Verbindung, dem Glycol

$$CH_2OH.CH_2OH$$

und ebenso die dreiwertigen Alkohole Glycerine. Die höherwertigen Alkohole stehen in engster Beziehung zur Chemie der Zuckergruppe und sie haben daher ihre Namen von denen der Zucker erhalten, indem man statt der Silben „ose“ die Silbe „it“ an den Wortstamm anhängte. So leiten sich von der Erythrose, Xylose, Mannose die Alkohole Erythrit, Xylit, Mannit ab. Die Alkohole der aromatischen Reihe, bei denen das Hydroxyl unmittelbar am Kohlenstoffkern sitzt, heißen Phenole. Sie zeigen in vieler Hinsicht ein besonderes und abweichendes Verhalten, so daß man sie eigentlich nicht zu den Alkoholen zählt. Sie werden deshalb auch für sich abgehandelt (vgl. den Artikel „Phenole“). Die eigentlichen Alkohole der aromatischen Reihe tragen die Hydroxylgruppen in der Seitenkette des Benzolkerns. Bei den heterozyklischen Verbindungen, welche Stickstoff-

atome im Ring enthalten, hat man den Alkoholen den Namen Alkine (aus Alkohol-Amine zusammengezogen) beigelegt, um anzudeuten, daß die Verbindungen auch basische Eigenschaften neben denen der Alkohole aufweisen (Ladenburg). Eine allgemeine Nomenklatur für sämtliche Alkohole erhält man nach den Vorschlägen des Genfer Nomenklaturkongresses (1892) durch Anhängen der Silbe „ol" an den Namen des Kohlenwasserstoffes, von dem der Alkohol entstammt. Sind mehrere Hydroxyle vorhanden, so schiebt man vor die Silbe ol noch die Silben „di" aber „tri" usw ein, z. B.

CH_3-CH_3 Aethan; CH_2OH-CH_3 Aethanol (Aethylalkohol); CH_2OH-CH_2OH Aethandiol (Glycol); $CH_2OH-CHOH-CH_2OH$ Propantriol (Glycerin)

Eine andere Bezeichnungsweise erhält man, wenn man die Alkohole als Derivate des einfachsten Alkohols, des Methylalkohols oder Carbinols CH_3OH auffaßt (Kolbe 1860). Es ergeben sich dann folgende Namen:

$CH_3.CH_2.CH_2.CH_2OH$ n-Propylcarbinol (n-Butylalkohol); $(CH_3)_3C.OH$ Trimethylcarbinol (tertiärer Butylalkohol)

Letztere Bezeichnungsweise eignet sich gut zur Unterscheidung von Isomeren.

Alle Alkohole lassen sich in drei große Klassen teilen, je nachdem das Kohlenstoffatom, das die Hydroyxlgruppe trägt, noch mit zwei, oder einem, oder gar keinem Wasserstoffatom verbunden ist. Man unterscheidet danach primäre, sekundäre und tertiäre Alkohole, z .B.

$CH_3.CH_2.CH_2OH$ primärer Alkohol (Propylalkohol)

$(CH_3)_2CH.OH$ sekundärer Alkohol (Isopropylalkohol),

$(CH_3)_3C.OH$ tertiärer Alkohol (Trimethylcarbinol)

1b) Bildungsweisen. Alkohole bilden sich

1. Aus Halogenalkylen, am besten aus Jodalkylen, durch Einwirkung von feuchtem Silberoxyd oder Bleioxyd.

$$C_2H_5.J + Ag(OH) = C_2H_5.OH + AgJ$$

Auch Wasser allein bewirkt die Umsetzung bei höherer Temperatur (etwa. 100°). Die tertiären Alkylhaloide reagieren am leichtesten.

2. Aus Alkylschwefelsäuren durch Verseifung

$$SO_3H.OC_2H_5 + H_2O = C_2H_5.OH + SO_4H_2.$$

Vermittels dieser Reaktion können die Alkohole aus ungesättigten Kohlenwasserstoffen (Olefinen) dargestellt werden, da sich die Alkylschwefelsäuren aus den Olefinen durch Addition mit Schwefelsäure bilden.

3. Aus organischen Säureestern durch Verseifung. Die Verseifung kann durch Erhitzen mit verdünnten Säuren oder Alkalien bewirkt werden, z. B.

$$CH_3.COOC_2H_5 + H_2O = CH_3.COOH + C_2H_5OH$$

Die Reaktion wird im großen bei der Seifenfabrikation angewendet (daher der Name „Verseifung", vgl. den Artikel „Fette, Oele, Seifen"). Man bedient sich ihrer auch gern, um besonders reine Alkohole zu gewinnen, da die Ester häufig leicht zu reinigen sind.

4. Aus primären Aminen durch salpetrige Säure

$$C_2H_5.NH_2 + NOOH = C_2H_5.OH + N_2 + H_2O.$$

5. Durch Reduktion von Aldehyden. Als Reduktionsmittel dienen Natrium, Natriumamalgam, Zinkstaub oder Eisen in Wasser oder verdünnten Säuren (Essigsäure, Schwefelsäure). Man erhält so primäre Alkohole, z. B.

$$C_2H_5.CHO + H_2 = CH_3.CH_2.CH_2OH$$

Propionaldehyd — Propylalkohol

6. Durch Reduktion von Ketonen. Hier entstehen sekundäre Alkohole, daneben die Pinakone (tertiäre Glycole)

$$CH_3-CO-CH_3 + 2H = CH_3-CHOH-CH_3$$

Aceton — Isopropylalkohol.

$$2\,CH_3-CO-CH_3 + 2H = HO-C(CH_3)_2-C(CH_3)_2-OH$$

Pinakon

7. Durch Reduktion von Säuren und Säurederivaten (Säurechloride, -anhydride, -ester, -amide). Es entstehen so primäre Alkohole, z. B.

$$CH_3.COCl + 4H = CH_3.CH_2OH + HCl.$$

Acetylchlorid

8. Aus Magnesiumhalogenalkylen. Diese schöne Reaktion (Grignard 1901) führt zu primären sowohl wie sekundären und tertiären Alkoholen und ist einer sehr allgemeinen Anwendung fähig. Die Magnesiumalkylhalogen-Verbindungen ähneln in ihrer Reaktionsweise den schon früher bekannten Zinkalkylen (Frankland 1849, Butlerow 1864), sind ihnen jedoch durch allgemeinere Verwendbarkeit und leichtere Handhabung (die Zinkalkyle sind selbstentzündlich) sehr überlegen, so daß man jetzt von den Synthesen mittels der genannten

Zinkverbindungen ganz abgekommen ist. Die Magnesiumalkylhaloide, welche sich leicht in Aether lösen, geben mit Aldehyden sekundäre, mit Ketonen oder Säureestern tertiäre Alkohole (Formaldehyd und Ameisensäureester geben primäre oder sekundäre Alkohole).

$$CH_3.CHO + C_2H_5.MgBr = CH_3.CH\begin{cases}OMgBr\\C_2H_5\end{cases}$$
Acetaldehyd

$$CH_3.CH\begin{cases}OMgBr\\C_2H_5\end{cases} + H_2O = CH_3.CH\begin{cases}OH\\C_2H_5\end{cases} + MgBrOH$$
Aethylmethylcarbinol
sek. Butylalkohol

In gleicher Weise entstehen aus

$$CH_3.CO.CH_3 + C_2H_5.MgBr =$$
Aceton

$$\begin{matrix}CH_3\\CH_3\end{matrix}>C\begin{cases}OMgBr\\C_2H_5\end{cases} \rightarrow \begin{matrix}CH_3\\CH_3\\C_2H_5\end{matrix}>C-OH.$$
tertiärer Amylalkohol

$$CH_3.COOC_2H_5 + C_2H_5.MgBr =$$
Essigester

$$CH_3.C\begin{cases}OMgBr\\OC_2H_5\\C_2H_5\end{cases}$$

$$CH_3.C\begin{cases}OMgBr\\OC_2H_5\\C_2H_5\end{cases} + C_2H_5MgBr =$$

$$CH_3.C\begin{cases}OMgBr\\C_2H_5\\C_2H_5\end{cases} + C_2H_5.OMgBr$$

$$CH_3.C\begin{cases}OMgBr\\C_2H_5\\C_2H_5\end{cases} + H_2O = CH_3.C\begin{cases}OH\\C_2H_5\\C_2H_5\end{cases}$$
Diäthylmethylcarbinol
tert. Hexylalkohol

Näheres über die mannigfaltige Verwendbarkeit der Magnesiumalkylhaloide und die einschlägige Literatur bei J. Schmidt Die organischen Magnesium-Verbindungen und ihre Anwendung zu Synthesen I und II. Stuttgart 1905 und 1908.

9. Durch Zersetzung von Aldehyden mittels starker Alkalilauge (Cannizzaro). Diese Reaktion führt zu primären Alkoholen, neben den entsprechenden Säuren, und ergibt besonders bei der aromatischen Reihe, aber auch bei den höheren Homologen der Fettreihe gute Ausbeuten. Im allgemeinen gelingt sie bei Aldehyden, die der Aldolkondensation nicht fähig sind, d. h. bei Verbindungen, die die $-C\begin{cases}O\\H\end{cases}$-Gruppe an einem tertiären Kohlenstoffatom tragen.

$$2C_6H_5.CHO + KOH = C_6H_5.CH_2OH + C_6H_5.COOK$$
Benzaldehyd — Benzylalkohol — Kaliumbenzoat

Außer diesen allgemeinen Bildungsweisen für die Alkohole existieren noch zahlreiche spezielle. Ein wichtiger Prozeß ist die Gärung der Zuckerarten, welche primäre Alkohole der 2. bis 5. Reihe liefert. Einige Alkohole bilden sich ferner bei der trockenen Destillation von Holz, z. B. Methylalkohol. Manche Alkohole finden sich endlich in der Natur vor in Form von Estern (ätherische Oele, Fette) und können daraus durch Verseifung gewonnen werden (vgl. den Artikel „Fette, Oele, Seifen).

1c) Physikalische Eigenschaften. Die Alkohole lassen eine regelmäßige Aenderung ihrer physikalischen Eigenschaften mit wachsendem Molekulargewicht erkennen. Die niedrigsten Glieder der Grenzalkohole (1. bis 3. Reihe) sind leicht bewegliche Flüssigkeiten, mit Wasser mischbar, von charakteristischem Geruch und brennendem Geschmack. Die Löslichkeit in Wasser nimmt bei wachsender Kohlenstoffzahl rasch ab. Die Alkohole der 4. bis 12. Reihe sind ölige Flüssigkeiten, die folgenden Verbindungen bei gewöhnlicher Temperatur fest und kristallinisch, ohne Geschmack und Geruch und dem Wachs ähnlich. Beim Uebergang der einwertigen Alkohole in mehrwertige gewinnen die Substanzen einen süßen Geschmack, und zwar um so mehr, je mehr Hydroxylgruppen in das Molekül eintreten. Gleichzeitig nimmt die Löslichkeit in Wasser zu, dagegen vermindert sich die Löslichkeit in organischen Lösungsmitteln wie Aether und Chloroform. Die Siedepunkte der Alkohole zeigen in homologen Reihen ein regelmäßiges Ansteigen um ungefähr 19° für eine CH_2-Gruppe.

Normale Grenzalkohole	Sdp.	Diff.
$CH_3.OH$	66°	
		12
$C_2H_5.OH$	78°	
		19,4
$C_3H_7.OH$	97,4°	
		20,1
$C_4H_9.OH$	117,5°	
		20,5
$C_5H_{11}.OH$	138°	
		20
$C_6H_{13}.OH$	158°	
		18
$C_7H_{15}.OH$	176°	
		19,5
$C_8H_{17}.OH$	195,5°	
		18
$C_9H_{19}.OH$	213,5°	
		17,5
$C_{10}H_{21}.OH$	231°	

Sekundäre Alkohole	Sdp.	Diff.
$CH_3.CHOH.CH_3$	82,8°	
		16,2
$CH_3.CHOH.C_2H_5$	99°	
		19,5
$CH_3.CHOH.C_3H_7$	118,5°	
		17,5
$CH_3.CHOH.C_4H_9$	136°	
		18,5
$CH_3.CHOH.C_5H_{11}$	164,5°	
		14,5
$CH_3.CHOH.C_6H_{13}$	179°	

Bei isomeren Alkoholen liegen die Siedepunkte häufig ziemlich nahe beieinander; doch zeigt regelmäßig der normale Alkohol den höchsten Siedepunkt, den niedrigsten dagegen der Alkohol mit der verzweigtesten

Kohlenstoffkette. Auch sieden die sekundären immer bei tieferer Temperatur als die primären. Die acht isomeren Amylalkohole mögen dieses illustrieren

	Sdp.
$CH_3.CH_2.CH_2.CH_2.CH_2OH$	137,8°
$(CH_3)_2>CH.CH_2.CH_2OH$	131,5°
$CH_3.CH_2(CH_3)>CH.CH_2OH$	128,7°
$(CH_3)_3\equiv C.CH_2OH$	112°
$CH_3.CH_2.CH_2.CH(OH).CH_3$	118,5°
$(CH_3)_2>CH.CH(OH).CH_3$	112,5°
$CH_3.CH_2.CH(OH).CH_2.CH_3$	116°
$(CH_3)_2>C(OH).CH_2.CH_3$	102°

Die Olefinalkohole haben beinahe denselben Siedepunkt wie die entsprechenden gesättigten Alkohole

$CH_3.CH_2.CH_2OH$	97,4°
$CH_2=CH.CH_2OH$	96,6°
$CH_3.CH_2.CH_2.CH_2OH$	116,8°
$CH_2=CH.CH_2.CH_2OH$	117°
$CH_3.CH_2.CH_2.CH(OH).CH_3$	118,5°
$CH_3.CH=CH.CH(OH).CH_3$	116°

Der Siedepunkt der Alkohole liegt um etwa 100° tiefer als der der zugehörigen Kohlenwasserstoffe. Beim Uebergang eines einwertigen Alkohols in ein Glycol, also bei nochmaliger Substitution von Wasserstoff durch Hydroxyl, fällt der Siedepunkt wiederum um etwa 100°, und ebenso beim Uebergang eines zweiwertigen Alkohols in einen dreiwertigen.

Die S c h m e l z p u n k t e der Alkohole steigen mit wachsendem Molekulargewicht, ohne aber besondere Regelmäßigkeiten erkennen zu lassen. Bei Isomeren zeigen die Alkohole mit der verzweigtesten Kohlenstoffkette meistens den höchsten Schmelzpunkt. So schmilzt von den 4 isomeren Butylalkoholen das Trimethylcarbinol $(CH_3)_3\equiv C.OH$ bei 25°, während die anderen 3 Alkohole bei gewöhnlicher Temperatur flüssig sind, und ebenso schmilzt von den 8 isomeren Amylalkoholen das Tertiärbutylcarbinol am höchsten (Fp. 49°). Im allgemeinen tritt beim Uebergang eines Kohlenwasserstoffs in einen Alkohol bedeutende Schmelzpunktserhöhung ein, die um so größer ist, je mehr Hydroxylgruppen der Alkohol enthält.

Die M o l e k u l a r v o l u m i n a der Alkohole beim Siedepunkt zeigen eine ziemlich konstante Differenz von ungefähr 21 für eine CH_2-Gruppe.

I. Grenzalk.	II. Mol.-Vol.	III. Diff.	IV. Aeth.	V. Kw.
CH_3 .OH	42,6			
		19,7		
C_2H_5 .OH	62,3			
		19,0		
C_3H_7 .OH	81,3		84,0	
		20,5		
C_4H_9 .OH	101,8		106,2	96,5
		21,6		
C_5H_{11}.OH	123,4		127,8	117,2
		22,6		
C_6H_{13}.OH	146,0		150,9	140,0
		21,9		
C_7H_{15}.OH	167,9		174,4	162,6
		22,4		
C_8H_{17}.OH	190,3		197,3	186,3

Bemerkenswert ist der Umstand, daß das Molekularvolumen der Alkohole stets beträchtlich kleiner ist als das der isomeren Alkyläther (letztere sind in obiger Tabelle unter IV angeführt). Beim Vergleich der Alkohole mit ihren zugehörigen Kohlenwasserstoffen ergibt sich, daß der Eintritt von Hydroxylsauerstoff die Molekularvolumina um 5 bis 6 erhöht. Die Molekularvolumina der Kohlenwasserstoffe finden sich unter V verzeichnet. Beim Eintritt weiterer Hydroxylsauerstoffatome ist die Erhöhung nicht mehr so groß.

D i e M o l e k u l a r r e f r a k t i o n nimmt für die Zusammensetzungsdifferenz von CH_2 um eine ziemlich konstante Größe zu. Bei Anwendung der L o r e n z - L o r e n t z schen Formel ergibt sich diese Größe für die rote Wasserstofflinie H_α zu 4,56.

	$\mathfrak{M}_\alpha$	Diff.	Ber.
Methylalkohol CH_3 .OH	8,16		8,22
		4,55	
Aethylalkohol C_2H_5.OH	12,71		12,78
		4,57	
Isopropylalkohol C_3H_7.OH	17,28		17,34
		4,68	
Isobutylalkohol C_4H_9.OH	21,96		21,90
		4,63	
Amylalkohol C_5H_{11}.OH	26,59		26,46

Isomere Alkohole weisen fast gleiche Molekularrefraktionen auf. Bei der Berechnung der Molekularrefraktion aus den Atomrefraktionen erhält der Hydroxylsauerstoff einen besonderen Wert $r_\alpha = 1,506$, während sich für den Aethersauerstoff und den Carbonylsauerstoff die Werte $r_\alpha = 1,655$ und $r_\alpha = 2,328$ ergeben. Enthält der Alkohol Doppelbindungen, so wird die Molekularrefraktion größer gefunden als der berechnete Wert, und zwar um durchschnittlich 1,84 für eine Aethylenbindung. Bei aromatischen Alkoholen bewirken die drei Doppelbindungen des Benzolkerns einen Zuwachs von 3 × 1,84 = 5,52:

		$\mathfrak{M}_\alpha$	Ber.	Diff.
Allylalkohol	C_3H_5.OH	16,81	15,22	1,63
Allyldimethylcarbinol	C_6H_{11}.OH	30,84	28,93	1,91
Diallylcarbinol	C_7H_{11}.OH	34,88	31,30	3,58 = 2 × 1,70
Diallylmethylcarbinol	C_8H_{13}.OH	39,29	35,87	3,42 = 2 × 1,71
Benzylalkohol	C_7H_7.OH	32,23	26,89	5,34 = 3 × 1,80
Phenylpropylalkohol	C_9H_{11}.OH	41,75	36,03	5,72 = 3 × 1,93
Zimmtalkohol	C_9H_9.OH	42,42	33,82	8,60 = 4 × 2,15

Eine Reihe von Alkoholen zeigt optisches Drehungsvermögen. Besonders bei mehrwertigen Alkoholen, die sich von den Zuckern ableiten und mehrere asymmetrische Kohlenstoffatome haben, z. B.

$$CH_2OH.\overset{*}{C}HOH.\overset{*}{C}HOH.\overset{*}{C}HOH.\overset{*}{C}HOH.CH_2OH$$

tritt diese Eigenschaft charakteristisch hervor. Dadurch werden die Isomerieerscheinungen außerordentlich kompliziert, doch ist es in einigen Fällen gelungen, sämtliche theoretisch möglichen Isomeren zu isolieren. Näheres findet sich im speziellen Teil (S. 228ff.).

Die elektromagnetische Drehung ist für die Alkohole zuerst von Perkin sen. bestimmt worden. Im allgemeinen wachsen die Molekularrotationen in homologen Reihen um 1,023 für eine CH_2-Gruppe

		s
$CH_3.OH$	$m_{19} = 1{,}640$	(0,617)
$C_2H_5.OH$	$m_{19} = 2{,}748$	0,697
$C_3H_7.OH$	$m_{16} = 3{,}768$	0,699
$C_7H_{15}.OH$	$m_{13} = 7{,}850$	0,689
$C_8H_{17}.OH$	$m_{20} = 8{,}880$	0,696

Isomere Alkohole weisen ungleiches Drehungsvermögen auf. Die Reihenkonstante s für die primären Alkohole ergibt sich zu 0,695, für die sekundären 0,864, für tertiäre 0,951. Ungesättigte Alkohole drehen stärker als die gesättigten. Auch erhöht der Ersatz eines Wasserstoffatoms durch ein Hydroxyl die Drehung beträchtlich, doch sind die Differenzen meistens nicht konstant.

Die Zähigkeit der Alkohole wächst in homologen Reihen ebenfalls mit dem Molekulargewicht, doch sind genauere Gesetzmäßigkeiten bisher nicht ermittelt. Die ungesättigten Alkohole sind flüssiger als die entsprechenden gesättigten. Ganz bedeutend wächst die Zähigkeit beim Uebergang einwertiger Alkohole in mehrwertige

		Z_{20}
Propylalkohol	$CH_3.CH_2.CH_2OH$	0,0223
Propenylglycol	$CH_3.CHOH.CH_2OH$	0,448
Glycerin	$CH_2OH.CHOH.CH_2OH$	7,776

Beim Uebergang der Alkohole zu Aldehyden oder Ketonen erfährt die Zähigkeit eine bedeutende Herabminderung, noch kleiner wird sie beim Uebergang in die entsprechenden Alkyläther.

Die Oberflächenspannung der Alkohole ist bei gewöhnlicher Temperatur bedeutend kleiner als die des Wassers, aber größer als die der zugehörigen Alkyläther. Je mehr Hydroxylgruppen der Alkohol enthält, desto größer wird auch die Oberflächenspannung. Sehr bemerkenswert ist, daß der Temperaturkoeffizient der molaren Oberflächenenergie für die Fettalkohole den Wert 1,0 bis 1,6 hat, ähnlich wie beim Wasser und wie bei den Säuren und im Gegensatz zu den sogenannten „normalen" Flüssigkeiten (Kohlenwasserstoffen, Aethern, Estern), bei denen diese Konstante zu 2,1 ermittelt ist. Hieraus darf man schließen, daß die Alkohole im flüssigen Zustande assoziierte Molekeln bilden, wie es auch nach einigen anderen Methoden (Molargewichtsbestimmungen auf kryoskopischem oder ebullioskopischem Wege, Bestimmung der Verdampfungswärmen) gefunden ist. Im Gaszustand besitzen die Alkohole aber einfache Molekeln, wie aus den normalen Dampfdichten hervorgeht, so daß sie also in ihrem Verhalten dem Wasser ähnlich sind.

Die Verbrennungswärmen wachsen bei den Alkoholen wie auch in den anderen homologen Reihen ziemlich konstant um 157 Cal. (= 655 kj) für eine CH_2-Gruppe.

	Cal.	Diff.
$CH_3.OH$	170,6	
		155,1
$C_2H_5.OH$	325,7	
		154,6
$C_3H_7.OH$	480,3	
		156,4
$C_4H_9.OH$ (Iso-)	636,7	
		157,2
$C_5H_{11}.OH$ (Iso-)	793,9	

Isomere Alkohole haben fast gleiche Verbrennungswärmen; so liefert Propylalkohol 480,3 Cal., Isopropylalkohol 478,3 Cal. Beim Uebergang eines Kohlenwasserstoffs in einen einwertigen Alkohol erfährt die Verbrennungswärme eine Verminderung um ziemlich konstant 49 Cal. und ebenso beim Eintritt eines zweiten Hydroxylsauerstoffatoms,; dagegen nimmt sie beim Eintritt eines dritten nur um ungefähr 34 Cal. ab:

		Cal.	Diff.
Propan	$CH_3.CH_2.CH_3$	529,3	
			49,0
Propylalkohol	$CH_3.CH_2.CH_2OH$	480,3	
			49,1
Propylenglycol	$CH_3.CHOH.CH_2OH$	431,2	
			33,8
Glycerin	$CH_2OH.CHOH.CH_2OH$	397,4	

Bei mehrwertigen Alkoholen sind also die Wasserstoffatome leichter substituierbar, eine Tatsache, die sich auch in der leichteren Bildung von Alkoholaten kund tut (s. Glycerin).

Die elektrische Leitfähigkeit der Alkohole ist sehr gering. Sie ist in den homologen Reihen bei den ersten Gliedern am größten und vermindert sich beim Zuwachs von CH_2-Gruppen, wird aber durch Einführung von OH-Gruppen erhöht. Die Dielektrizitätskonstante

der Alkohole ist beträchtlich kleiner als beim Wasser, aber größer als die der Aether, Ester und Kohlenwasserstoffe. Sie hat ungefähr gleiche Größenordnung wie bei den Aldehyden und Ketonen. In homologen Reihen nimmt sie ab; bei isomeren Alkoholen ergibt sich für den primären stets der größte Wert:

		t	DC $\lambda = \infty$
Methylalkohol	$CH_3.OH$	20°	34,8
Aethylalkohol	$C_2H_5.OH$	20°	25,2
n-Propylalkohol	$CH_3.CH_2.CH_2.OH$	20°	22,2
Isopropylalkohol	$CH_3.CHOH.CH_3$	20°	15,4
n-Butylalkohol	$CH_3(CH_2)_2CH_2.OH$	19°	19,2
Isobutylalkohol	$(CH_3)_2CH.CH_2OH$	20°	20
sec-Butylalkohol	$C_2H_5.CHOH.CH_3$	19°	15,5
tert-Butylalkohol	$(CH_3)_3.COH$	19°	11,4
Amylalkohol	$C_5H_{11}.OH$	20°	16
Heptylalkohol	$C_7H_{15}.OH$	21°	6,6

Durch Eintritt von Hydroxylgruppen wird die Dielektrizitätskonstante erhöht (Glycol $DC_{20} = 41,2$, Glycerin $DC_{20} = 56,2$). In direktem Parallelismus zur Dissoziationskonstante steht die dissoziierende Kraft der Alkohole als Lösungsmittel, wie zahlreiche Versuche ergeben haben. So beträgt der Dissoziationsgrad für Tetraäthylammoniumjodid $N(C_2H_5)_4J$ bei 25° (v = 1000 l) in Wasser 98 %, in Methylalkohol 88 %, in Aethylalkohol 78 %. Doch liegen die Dissoziationsverhältnisse ziemlich viel komplizierter als beim Wasser; das Verdünnungsgesetz ist meistens nicht erfüllt.

1 d) Chemisches Verhalten. Die Alkohole sind neutrale Substanzen von großer Reaktionsfähigkeit. Diese wird hauptsächlich durch die Anwesenheit der Hydroxylgruppe bestimmt. Einige Reaktionen sind denen des Wassers sehr ähnlich. So geben die Alkohole mit einer Reihe von organischen Salzen kristallisierte Additionsverbindungen, in denen sie die Rolle des Kristallwassers spielen, z. B. mit Calciumchlorid die Verbindungen $CaCl_2(CH_3OH)_4$, $CaCl_2(C_2H_5OH)_4$. Ferner wirken Alkalimetalle unter lebhafter Wasserstoffentwickelung ein

$$C_2H_5.OH + Na = C_2H_5.ONa + H.$$

Die entstehenden Verbindungen heißen Alkoholate und sind in Alkohol meistens löslich, in Aether dagegen unlöslich. Durch Wasser werden sie rasch in Alkohole und Alkalihydroxyde zerlegt

$$C_2H_5.ONa + H_2O = C_2H_5.OH + NaOH.$$

Die Hydroxylgruppe der Alkohole wirkt auf zahlreiche Substanzen unter Wasseraustritt ein, eine Reaktion, die ganz der Salzbildung aus Säuren und Basen in der anorganischen Chemie entspricht und bei der der Alkohol die Rolle der Base übernimmt. So treten die Säuren mit den Alkoholen zu Estern zusammen (vgl. den Artikel „Ester“)

$$\underset{\text{Schwefelsäure}}{H_2SO_4} + C_2H_5OH = \underset{\text{Schwefelsäureäthylester.}}{SO_2H.O.C_2H_5} + H_2O$$

$$\underset{\text{Essigsäure}}{CH_3.COOH} + C_2H_5OH = \underset{\text{Essigsäureäthylester.}}{CH_3.COOC_2H_5} + H_2O$$

Durch Erhitzen mit konzentrierten Halogenwasserstoffsäuren entstehen Halogenalkyle (vgl. den Artikel „Kohlenwasserstoffe“)

$$HCl + C_2H_5OH = C_2H_5.Cl + H_2O.$$

Die Bildung der Ester und Halogenalkyle vollzieht sich langsam; meistens ist ein mehrstündiges Erhitzen erforderlich, während die Salzbildung in der anorganischen Chemie momentan vor sich geht, eine Tatsache, die für die Ionentheorie von großer Bedeutung ist. Ester entstehen auch aus den Alkoholen durch Einwirkung von Säurechloriden meistens unter heftiger Reaktion

$$\underset{\text{Acetylchlorid}}{CH_3.COCl} + C_2H_5OH = \underset{\text{Essigester.}}{CH_3.COOC_2H_5} + HCl$$

Mittels Halogenphosphor lassen sich die Hydroxylgruppen leicht gegen Halogen austauschen. Es bilden sich dabei die den Alkoholen korrespondierenden Halogenalkyle

$$3C_2H_5.OH + PCl_3 = 3C_2H_5Cl + P(OH)_3.$$

Werden die Alkohole der Oxydation unterworfen, so entstehen verschiedene Produkte, je nachdem ein primärer, sekundärer oder tertiärer Alkohol vorliegt. Das Oxydationsmittel greift meistens an dem Kohlenstoffatom an, das schon eine Hydroxylgruppe trägt. Es bildet sich so aus einem primären Alkohol zunächst ein Aldehyd und aus diesem eine einwertige Carbonsäure von gleicher Kohlenstoffzahl

$$\underset{\text{Propylalkohol}}{CH_3.CH_2.CH_2OH} \rightarrow \underset{\text{Propionaldehyd}}{CH_3.CH_2.C\begin{smallmatrix}\nearrow O\\ \searrow H\end{smallmatrix}} \rightarrow \underset{\text{Propionsäure}}{CH_3.CH_2.COOH}$$

Sekundäre Alkohole liefern Ketone von ebenfalls gleicher Kohlenstoffzahl

$$\underset{\text{Isopropylalkohol}}{CH_3.CH(OH).CH_3} \rightarrow \underset{\text{Aceton}}{CH_3.CO.CH_3}$$

Unterliegt dieses Keton einer weiteren Oxydation, so entstehen Säuren von niederer Kohlenstoffzahl

$$\underset{\text{Aceton}}{CH_3.CO.CH_3} + 2O_2 = \underset{\text{Essigsäure}}{CH_3.COOH} + CO_2 + H_2O.$$

Bei tertiären Alkoholen endlich bewirkt das Oxydationsmittel sofort einen Zerfall der Kohlenstoffkette und die entstandenen Produkte enthalten weniger Kohlenstoffatome als der Alkohol. So entsteht aus dem Trimethylcarbinol, wenn das das Hydroxyl tragende

Kohlenstoffatom bei der Oxydation angegriffen wird, Aceton, Essigsäure und Kohlendioxyd.

Bei den ungesättigten Alkoholen tritt neben diesen Oxydationsvorgängen leicht, wie auch sonst bei den Olefinverbindungen, eine Sprengung der Kohlenstoffkette an der Stelle der Doppelbindung ein. Im allgemeinen liefern verschiedene Oxydationsmittel häufig auch verschiedene Produkte. Chromsäure bewirkt bei hochatomigen Alkoholen meistens eine zu heftige Oxydation, so daß die Kohlenstoffkette fast immer vernichtet wird, und nur Produkte von niederer Kohlenstoffzahl, wie Kohlendioxyd, Oxalsäure usw. erhalten werden. Aehnlich wirkt Kaliumpermanganat in alkalischer Lösung. Dagegen erweist sich starke Salpetersäure in vielen Fällen als sehr geeignetes Oxydationsmittel.

Der Reduktion sind die Alkohole sehr schwer zugänglich. Am besten wirkt noch der Jodwasserstoff ein. Meistens entstehen dabei aber gleichzeitig noch jodhaltige Substitutionsprodukte. So gewinnt man aus Glycerin durch Behandlung mit Jodwasserstoff Isopropyljodid

$$CH_2OH.CHOH.CH_2OH \rightarrow CH_3.CHJ.CH_3$$

Die freien Halogene wirken auf die Alkohole ziemlich energisch ein, und zwar meistens gleichzeitig substituierend und oxydierend. Die Herstellung von Chloral $CCl_3.CHO$ aus Aethylalkohol mittels Einleiten von Chlor ist ein Beispiel hierfür. Wasser entziehende Mittel wirken je nach Bedingungen in verschiedener Weise auf die Alkohole ein. Durch Wasserabspaltung aus einem Molekül Alkohol entstehen Olefine, aus zwei Molekülen Aether

$$C_2H_5.OH - H_2O = \underset{\text{Aethylen}}{CH_2{:}CH_2}$$

$$2\,C_2H_5.OH - H_2O = \underset{\text{Aethyläther.}}{C_2H_5.O.C_2H_5}$$

Die Olefinbildung vollzieht sich bei primären Alkoholen unter Verwendung von wasserentziehenden Mitteln wie Chlorzink und Schwefelsäure erst bei hoher Temperatur. Bei den sekundären und tertiären Alkoholen verläuft die Reaktion leichter, bei den tertiären oft so leicht, daß die Alkohole auch ohne Zusatz von wasserentziehenden Stoffen durch eine geringe Temperaturerhöhung allein schon Wasser abspalten. Man erhält so häufig bei der Synthese tertiärer Alkohole, z. B. mittels Magnesiumhalogenalkylverbindungen statt des gewünschten Alkohols einen ungesättigten Kohlenwasserstoff. Die Aetherbildung findet häufig gleichzeitig mit der Bildung der ungesättigten Kohlenwasserstoffe statt. Bei einigen Alkoholen wird der Aetherbildungsprozeß aber durch Anwesenheit von Katalysatoren so begünstigt, daß er ganz in den Vordergrund tritt. Solche Katalysatoren sind Schwefelsäure, Benzolsulfosäure u. a. Ihre Wirkungsweise beruht auf der Entstehung von Estern, welche mit überschüssigem Alkohol weiter reagieren und dabei wieder in den freien Katalysator zerfallen, z. B.

I. $H_2SO_4 + C_2H_5OH = C_2H_5.O.SO_3H + H_2O.$

II. $C_2H_5.O.SO_3H + C_2H_5OH = C_2H_5.O.C_2H_5 + H_2SO_4.$

Um die drei Alkoholklassen primäre, sekundäre und tertiäre Alkohole voneinander zu unterscheiden, kann man sich verschiedener Reaktionen bedienen. Zunächst bietet die Oxydation hierzu einen guten Weg, indem jeweilig verschiedene Produkte entstehen, wie oben gezeigt wurde. Weiterhin eignet sich für diesen Zweck die Erhitzung mit Bariumhydroxyd, die Messung der Esterifizierungsgeschwindigkeit und die Ueberführung in die entsprechenden Nitroverbindungen. Beim Kochen mit Bariumhydroxyd geben die primären und sekundären Alkohole Bariumalkoholate, die tertiären nicht. Die Esterifizierungsgeschwindigkeit ist am größten bei den primären Alkoholen, am kleinsten bei den tertiären. Führt man die Esterifizierung so aus, daß man äquivalente Mengen Alkohol und Säure eine Stunde auf 150° bis 155° erhitzt und die unverbrauchte Säure zurücktitriert, so sind von einem primären Alkohol 46 bis 47 % (Methylalkohol macht auch hier eine Ausnahme), von einem sekundären 17 bis 26 %, von einem tertiären nur 1 bis 2 % umgesetzt. Führt man endlich die Alkohole mit Jodphosphor in Alkyljodide und diese mittels Silbernitrit in die entsprechenden Nitroverbindungen über, so kann man mit Hilfe der letztgenannten Verbindungen die drei Alkoholklassen durch Farbenreaktionen unterscheiden. Die primären Nitroverbindungen färben sich nämlich bei Einwirkung von salpetriger Säure rot, die sekundären blau, die tertiären gar nicht.

2. Spezielle Alkohole. 2A. A l k o h o l e d e r F e t t r e i h e. a) G r e n z a l k o h o l e.

1. M e t h y l a l k o h o l, Methanol, Holzgeist, Carbinol $CH_3.OH$ (B o y l e 1661), entsteht in reichlicher Menge bei der trockenen Destillation des Holzes. In der Natur findet er sich als Salicylsäuremethylester $HO.C_6H_4.COOCH_3$ in dem sogenannten Wintergrünöl, ferner im Neroliöl als Anthranilsäuremethylester, und in einigen anderen Verbindungen.

Zur technischen Gewinnung des Methylalkohols wird Holz oder Rübenmelassenschlempe in eisernen Retorten auf etwa 500° erhitzt und das wässerige Destillat (roher „Holzessig") gereinigt. Die Verunreinigungen bestehen hauptsächlich aus Aceton, Essigsäure und Essigsäuremethylester, und

man entfernt diese durch Kochen mit Kalk und durch Rektifizieren. Zur völligen Reinigung des Alkohols, besonders zur Beseitigung des Acetons, kann man ihn mit wasserfreiem Chlorcalcium digerieren. Es bildet sich eine kristallinische Verbindung $CaCl_2.4CH_3OH$, die abfiltriert und dann mit Wasser wieder zersetzt wird. Die Entwässerung geschieht durch Pottasche. Sehr reinen Methylalkohol erhält man auch durch Verseifung einiger leicht zu reinigenden Säureester, z. B. des schön kristallisierenden Oxalsäuredimethylesters, oder des hoch siedenden Benzoesäuremethylesters.

Zur quantitativen Bestimmung des Methylalkohols im Holzgeist führt man ihn mittels Jodphosphor in Methyljodid über. Dieses erzeugt beim Einleiten in eine wässerig-alkoholische Silbernitratlösung einen Niederschlag von Jodsilber, der gewogen wird. Im allgemeinen kann man alle Körper, die die Gruppe CH_3O (Methoxylgruppe) enthalten, durch Jodwasserstoffsäure in Methyljodid verwandeln und so bestimmen (quantitative Bestimmung der Methoxylgruppen nach Zeisel).

Aceton wird im Holzgeist durch Ueberführung in Jodoform mittels Jod in alkalischer Lösung erkannt. Aethylalkohol im Holzgeist verrät sich beim Erwärmen mit konzentrierter H_2SO_4 durch Bildung von Aethylen, während Methylalkohol hierbei neben Dimethylsulfat (SO_4CH_3) nur Methyläther $CH_3.O.CH_3$ entstehen läßt.

Methylalkohol ist eine brennend schmeckende, angenehm riechende, mit Wasser, Aethylalkohol und Aether in allen Verhältnissen mischbare Flüssigkeit. Fp. — 94°, Sdp. 67° bei 760 mm, sp. Gew. 0,8142 bei 0°. In verdünntem Zustand wirkt der Methylalkohol berauschend, in reinem giftig. Seine Verwendung findet er als Brennstoff, als Lösungsmittel, zum Denaturieren des Aethylalkohols und zur Bereitung vieler Methylverbindungen (zum „Methylieren"), besonders in der Farbstofftechnik.

Der Methylalkohol unterscheidet sich von allen anderen Alkoholen dadurch, daß das mit der Hydroxylgruppe verbundene Kohlenstoffatom noch 3 Wasserstoffatome trägt. Infolgedessen geht die Oxydation nicht nur bis zur entsprechenden einbasischen Fettsäure (der Ameisensäure), sondern bis zur Kohlensäure

$$C(OH)(H)(H)(H) \rightarrow C(=O)(H)(H) \rightarrow C(=O)(OH)(H) \rightarrow C(=O)(OH)(OH)$$

Methylalkohol — Formaldehyd — Ameisensäure — Kohlensäure

$$= (C(=O)=O + H_2O)$$

Kohlendioxyd

Diese Oxydation findet sehr leicht an der Luft statt bei Gegenwart von Katalysatoren, z. B. Platinmohr, ein Vorgang, der häufig bei Taschenfeuerzeugen benutzt wird. Der Alkohol brennt mit blaßblauer kaum sichtbarer Flamme.

Beim Mischen mit Wasser tritt eine Kontraktion der Flüssigkeiten ein. Der Prozentgehalt von Methylalkohol-Wasser-Gemischen läßt sich durch Bestimmen des spezifischen Gewichts ermitteln. Nachstehende Tabelle gibt den Alkoholgehalt in Gewichtsprozenten an für eine Temperatur von 15,56° bezogen auf Wasser von 4°

Gew. Proz.	$d_{4}^{15,56}$
0	0,9991
10	0,9826
20	0,9681
30	0,9536
40	0,9351
50	0,9186
60	0.8980
70	0,8504
80	0,8374
90	0,8240
95	0,8101
98	0,8016
100	0,7959

Die Dampfspannungen von —20° bis +155° sind von Regnault gemessen. Die kritische Temperatur ist 240,0°, der kritische Druck 78,63 Atmosphären. Der Brechungsexponent n_D bei 17,4° beträgt 1,3297. Der kubische Ausdehnungskoeffizient zwischen 0° und 61° ist zu 0,0001134 ermittelt worden, die spezifische Wärme zwischen 15° und 20° zu 0,6009, die absolute Wärmeleitungsfähigkeit zwischen 9° und 15° zu 0,000495. Die Siedepunktserhöhung, die 1 g-Mol. einer sich normal verhaltenden Substanz in 100 g Methylalkohol hervorruft, beträgt 8,4°. Die Oberflächenspannung bei 20° hat sich zu 23,02 Dynen/cm ergeben ($a^2mm^2 = 5,937$). Für die absolute Zähigkeit bei 20° ist der Wert 0,00591 gefunden (spezifische Zähigkeit $Z_{20} = 34,4$). Die Verbrennungswärme ist zu 170,6 Cal. bestimmt. Daraus berechnet sich für die Bildungswärme des gasförmigen Methylalkohols 53,5 Cal. des flüssigen 61,4 Kal. Die Verdampfungswärme beträgt 267,5 Cal.

Methylalkohol verbindet sich mit Salzen und Basen nach Art des Kristallwassers: $CaCl_2 . 4CH_3OH$; $BaO . 2CH_3OH$; $MgCl_2 .6CH_3OH$ u. a. Kalium und Natrium lösen sich im Methylalkohol auf unter Wasserstoffentwickelung und bilden die Alkoholate $CH_3.OK$ resp. $CH_3.ONa$, die durch Wasser leicht zersetzt werden.

Beim Erhitzen mit Natronkalk bildet Methylalkohol Natriumformiat unter Entbindung von Wasserstoff

$$CH_3.OH + NaOH = H.COONa + 2H_2.$$

Leitet man die Dämpfe des Methylalkohols über erhitzten Zinkstaub, so zerfallen sie glatt in Kohlenoxyd und Wasserstoff.

$$CH_3.OH = CO + 2H_2.$$

Aethylalkohol, Methylcarbinol, Aethanol, Weingeist, Spiritus oder Alkohol schlechthin $CH_3.CH_2.OH$. Der Aethylalkohol kommt in der Natur nur selten vor. In den unreifen Früchten von Heracleum giganteum und Heracleum spondylium findet er sich zusammen mit Buttersäuremethylester. Er tritt ferner auf im Harn der Diabetiker und im Harn des gesunden Menschen nach reichlichem Alkoholgenuß. Auch überall da, wo organische Stoffe in der Natur sich durch Gärung zersetzen, läßt sich Aethylalkohol nachweisen.

Der Alkohol läßt sich nach allen oben angeführten allgemeinen Bildungsweisen darstellen. Aus den Elementen läßt er sich erhalten, indem man Acetylen, das durch direkte Vereinigung von Kohlenstoff in Wasserstoff vermittels elektrischer Entladung gewonnen wird, durch Reduktion in Aethylen verwandelt, und letzteres mit rauchender Schwefelsäure und dann mit kochendem Wasser behandelt

$$\begin{matrix} CH & & CH_2 & & CH_2OSO_3H & & CH_2OH \\ ||| & \rightarrow & || & \rightarrow & | & \rightarrow & | \\ CH & & CH_2 & & CH_3 & & CH_3 \end{matrix}$$

Im großen wird der Alkohol nur durch Gärung zuckerhaltiger Flüssigkeiten dargestellt. Man versteht unter „geistiger“ oder „Alkoholgärung“ den Zerfall des Zuckers in Alkohol und Kohlensäure

$$C_6H_{12}O_6 = 2C_2H_5OH + 2CO_2$$

unter dem Einfluß eines geformten Fermentes, des Hefepilzes (Saccharomyces cerevisiae seu vini). Die Gärung erfordert gewisse Bedingungen: die wässerige Zuckerlösung muß einige zur Ernährung des Hefepilzes notwendigen Bestandteile (anorganische, namentlich phosphorsaure Salze und Eiweißverbindungen) enthalten und die Temperatur darf nicht unter $+3^0$ und nicht über 30^0 betragen. Steigt der Alkoholgehalt über 14 %, so kann der Pilz nicht mehr weiter wachsen und die Gärung kommt zum Stillstand. Durch Erhitzen auf 60^0 oder durch Zusatz von Desinfizierungsmitteln (Sublimat, Salicylsäure u. a.) wird der Hefepilz getötet und die Gärung kann auf diese Weise ganz unterdrückt werden.

Außer dem Aethylalkohol entstehen bei der Gärung in geringerer Menge noch einige Nebenprodukte: höhere Homologe des Aethylalkohols, Aldehyd, Aether, Glycerin und Fettsäuren. Die Nebenprodukte, welche einen höheren Siedepunkt als der Aethylalkohol besitzen und demnach bei der Destillation den Nachlauf bilden, faßt man unter dem Namen „Fuselöle“ zusammen. In ihnen ist neben n-Propylalkohol, Isopropylalkohol und Isobutylalkohol namentlich sogenannter „Gärungsamylalkohol“ enthalten. Die Nebenprodukte entstehen meist erst gegen Ende der Gärung. Ihre Menge und ihre Zusammensetzung hängt von der Natur des verarbeiteten Rohmaterials ab.

Ueber die Bedeutung, welche die Hefe für den Gärungsprozeß hat, sind verschiedene Ansichten ausgesprochen worden. Pasteur (1857) gelangte durch seine Versuche zur Ueberzeugung, daß die Gärung nur unter dem Einfluß lebender Hefezellen stattfinde, der Gärungsprozeß also ein Produkt ihrer Lebenstätigkeit sei. Liebig dagegen schrieb den Hefezellen nur eine sekundäre Bedeutung zu. 1897 zeigte dann E. Buchner, daß die aus getöteten Hefezellen ausgepreßte Flüssigkeit, der Preßsaft, eine Zuckerlösung ebenfalls in Gärung zu versetzen vermag. Der Preßsaft enthält eine Eiweißsubstanz, die Zymase, welche zu den Enzymen (ungeformten Fermenten) gehört. Ihre Wirkungsweise ist vielleicht, wie bei vielen anderen Enzymen, eine katalytische.

Die für die Gärung erforderliche Zuckerlösung wird in der Technik aus zuckerhaltigen Pflanzensäften (von Trauben, Aepfeln, Johannisbeeren, Zuckerrüben usw.) oder durch Hydrolyse von Stärke gewonnen. Als stärkemehlhaltige Materialien werden Getreidesamen und namentlich Kartoffeln verwendet. Die Stärke geht durch Aufnahme von Wasser in Malzzucker (Maltose) und weiterhin in Traubenzucker und Dextrin über. Die Hydrolyse kann durch warme verdünnte Schwefelsäure bewerkstelligt werden. In der Praxis wendet man aber für diese Reaktion wieder ein Enzym an, und zwar die Diastase, welche sich im Malz (der keimenden Gerste) findet. Die Operation, welche Maischen genannt wird, wird bei 57^0 bis 66^0 ausgefürht und erfordert nur kurze Zeit. Die verzuckerte Stärke (die „Maische“) wird dann auf die Gärungstemperatur gebracht und auf Zusatz von Hefe vergoren, worauf dann aus der vergorenen Maische durch Destillation der Rohspiritus gewonnen und durch wiederholte fraktionierte Destillation gereinigt wird (Näheres über die Gärungserscheinungen siehe in Artikel „Gärung“).

Auch der beste Alkohol des Handels ist nicht ganz wasserfrei, sondern enthält noch 0,5—5% Wasser. Um vollständig wasserfreien (absoluten) Alkohol herzustellen, kocht man ihn mit viel gebranntem Kalk (in groben Stücken) und destilliert dann ab, wobei man Sorge trägt, daß der übergehende Alkohol, der sehr hygroskopisch ist, nicht Wasser aus der Luft absorbiert. Als Entwässerungsmittel lassen sich auch geglühte Pottasche, entwässertes Kupfersulfat, kleine Mengen

metallischen Natriums oder wasserfreies Bariumoxyd verwenden. Bei letzterem Mittel kann man den Punkt, wo die vollständige Entwässerung eingetreten ist, an der Gelbfärbung des Alkohols erkennen, da sich das Bariumhydroxyd erst in ganz absolutem Alkohol mit gelber Farbe (Bildung von Bariumalkoholat $Ba(OC_2H_5)_2$) löst.

Den Nachweis von Wasser im Alkohol kann man demnach mit der eben genannten Bariumalkoholatreaktion ausführen (absoluter Alkohol muß Ätzbaryt mit gelber Farbe lösen). Reiner Alkohol verändert ferner entwässertes weißes Kupfersulfat nicht, während der wasserhaltige dasselbe blau färbt. Auch wird eine Lösung von flüssigem Paraffin in Chloroform oder Benzol beim Vermischen mit Alkohol nur dann getrübt, wenn letzterer Wasser enthält. Weiterhin wirkt nur wässeriger Alkohol auf Calciumcarbid unter Acetylenentwickelung, absoluter nicht. Gießt man endlich wasserfreien Alkohol auf ein Gemisch von Antrachinon und Natriumamalgam, so entsteht eine dunkelgrüne Lösung; ist aber ein wenig Wasser zugegen, so färbt sich die Flüssigkeit rot.

Physikalische Eigenschaften. Der Alkohol ist eine leicht bewegliche, wasserhelle Flüssigkeit von angenehmem Geruch und brennendem Geschmack. Er ist leicht entzündlich und brennt mit blaßblauer, nicht leuchtender Flamme. Der Siedepunkt liegt bei 78,3° (760 mm) und das spezifische Gewicht beträgt bei 20° 0,789. Beim Abkühlen mit flüssiger Luft erstarrt er zu einer weißen Masse, die bei —112° wieder schmilzt. Der Alkohol ist hygroskopisch und mischt sich mit Wasser in jedem Verhältnis. Hierbei tritt geringe Wärmeentwickelung und Kontraktion auf, deren Maximum sich ergibt, wenn auf 1 Mol. Alkohol etwa 3 Mol. Wasser kommen (52 Vol. Alkohol und 48 Vol. Wasser geben bei 20° nur 96,3 Vol. statt 100). Der Wassergehalt des Alkohols wird im Handel meistens durch Bestimmung des spezifischen Gewichtes ermittelt. Man bedient sich hierzu sogenannter „Alkoholometer", d. s. Aräometer, auf deren Skala sich gleich die Prozente für eine bestimmte Temperatur (15° C) befinden und die meist noch mit einem Thermometer verbunden sind. Man rechnet entweder nach Volumprozenten (Graden nach Tralles) oder nach Gewichtsprozenten (Graden nach Richter).

Nachstehende Tabelle (nach Berechnung der Kaiserlichen Normal-Eichungs-Kommission) gibt die Dichten wässeriger Alkohollösungen bei 15° (bezw. 15,56) bezogen auf Wasser von 15° (bezw. 15,56°) an.

Ferner kann man zur Erkennung des Wassergehaltes von Alkohol den Siedepunkt oder den Dampfdruck bestimmen. Die erste Bestimmung wird im „Ebullioskop" ausgeführt und beruht darauf, daß der Siedepunkt von Alkohol-Wasser-Gemischen niedriger liegt als der des Wassers. Bei der zweiten Methode wird mittels eines „Vaporimeters" die Dampftension gemessen. Der Dampfdruck des Alkohols ist größer als der des Wassers. Je

Tabelle.[1])

%	d_{15}^{15} für Gew.-prozente	$d_{15,56}^{15,56}$ für Volum-prozente	%	d_{15}^{15} für Gew.-prozente	$d_{15,56}^{15,56}$ für Volum-prozente
1	0,99 812	0,99 847	51	0,91 644	0,93 150
2	99 630	99 699	52	91 421	93 052
3	99 454	99 555	53	91 197	92 850
4	99 284	99 415	54	90 972	92 646
5	99 120	99 279	55	90 746	92 439
6	98 963	99 147	56	90 519	92 229
7	98 812	99 019	57	90 292	92 015
8	98 667	98 895	58	90 063	91 979
9	98 528	98 774	59	89 834	91 580
10	98 393	98 657	60	89 604	91 358
11	98 262	98 543	61	89 373	91 134
12	98 135	98 432	62	89 141	90 907
13	98 010	98 324	63	88 909	90 678
14	97 888	98 218	64	88 676	90 447
15	97 768	98 114	65	88 443	90 214
16	97 648	98 011	66	88 208	89 978
17	97 528	97 909	67	87 974	89 740
18	97 408	97 808	68	87 738	89 499
19	97 287	97 708	69	87 502	89 256
20	97 164	97 608	70	87 265	89 010
21	97 040	97 507	71	87 028	88 762
22	96 913	97 406	72	86 789	88 511
23	96 783	97 304	73	86 550	88 257
24	96 650	97 201	74	86 310	88 000
25	96 513	97 097	75	86 070	78 740
26	96 373	96 991	76	85 828	87 477
27	96 228	96 883	77	85 586	87 211
28	96 080	96 772	78	85 342	86 943
29	95 927	96 658	79	85 098	86 670
30	95 770	96 541	80	84 852	86 395
31	95 608	96 421	81	84 606	86 116
32	95 443	96 298	82	84 358	85 833
33	95 273	96 172	83	84 108	85 547
34	95 099	96 043	84	83 857	85 256
35	94 920	95 910	85	83 604	84 961
36	94 738	95 773	86	83 349	84 660
37	94 552	95 632	87	83 091	84 355
38	94 363	95 487	88	82 832	84 044
39	94 169	95 338	89	82 569	83 726
40	93 973	95 185	90	82 304	83 400
41	93 773	95 029	91	82 036	83 065
42	93 570	94 868	92	81 763	82 721
43	93 365	94 704	93	81 488	82 365
44	93 157	94 563	94	81 207	81 997
45	92 947	94 364	95	80 923	81 616
46	92 734	94 188	96	80 634	81 217
47	92 519	94 008	97	80 389	80 800
48	92 303	93 824	98	80 040	80 359
49	92 085	93 636	99	79 735	79 891
50	91 865	93 445	100	79 425	79 391

[1]) Siehe auch Windisch, Tafeln zur Ermittelung des Alkoholgehaltes von Alkoholwassergemischen aus dem spezifischem Gewicht. Berlin 1893

alkoholreicher also die Flüssigkeit, desto höher der Dampfdruck. Weiterhin bietet die Messung der Oberflächenspannung ein Mittel zur Erkennung der „Stärke" des Alkohols, das allerdings nur bei geringem Alkoholgehalt gute Resultate ergibt. Durch Alkohol wird die Oberflächenspannung des Wassers stark erniedrigt und man bestimmt diese Erniedrigung mit einem „Stalagmometer", einem Apparat, durch welchen die Tropfenzahl eines konstanten Flüssigkeitsvolums gezählt wird (Traube).

Der Alkohol ist ein ausgezeichnetes Lösungsmittel für viele organische und anorganische Stoffe. Auch Gase lösen sich in ihm leicht. Die Tension des Alkohols von — 20 bis $+155^0$ ist von Regnault gemessen. Die kritische Temperatur beträgt $243{,}1^0$, der kritische Druck 62,96 Atmosphären. Der Brechungsexponent n_D bei $17{,}5^0$ ist zu 1,36946 ermittelt. Der kubische Ausdehnungskoeffizient zwischen 0^0 und 30^0 ist 0,001101, die spezifische Wärme bei 20^0 0,908, das absolute Wärmeleitungsvermögen zwischen 9^0 und 15^0 0,000423. Die Siedepunktserhöhung, die 1 g-Mol. einer sich normal verhaltenden Substanz in 100 g Alkohol als Lösungsmittel hervorruft, beträgt $11{,}5^0$. Für die absolute Zähigkeit bei 20^0 ist 0,00192 gefunden (spezifische Zähigkeit $Z_{20} = 119{,}5$). Die Oberflächenspannung bei 20^0 ergibt sich zu 22,03 Dynen/cm ($a^2mm^2 = 5{,}890$). Die Verbrennungswärme ist zu 325,7 Cal. bestimmt worden. Daraus berechnet sich für die Bildungswärme des gasförmigen Aethylalkohols 59,8 Cal., des flüssigen 69,9 Cal. Die Verdampfungswärme beträgt 205 Cal. Der Alkohol wirkt berauschend, in konzentriertem Zustand ist er ein scharfes Gift.

Das chemische Verhalten des Aethylalkohols ist im allgemeinen Teil schon besprochen. Es mögen noch einige spezielle Reaktionen erwähnt werden. Bei der Oxydation geht der Alkohol normalerweise in Acetaldehyd und Essigsäure über

$$CH_3.CH_2OH \rightarrow CH_3.C\begin{matrix}\diagup O\\ \diagdown H\end{matrix} \rightarrow CH_3.COOH$$

Oxydiert man aber mit Salpetersäure unter geeigneten Bedingungen, so wird außer der CH_2OH-Gruppe auch die CH_3-Gruppe in Mitleidenschaft gezogen und es entstehen Glyoxal, Glycolsäure, Glyoxalsäure und Oxalsäure

$$\begin{array}{ccccccc} CHO & & CH_2{-}OH & & COOH & & COOH \\ | & \leftarrow & | & \rightarrow & | & \rightarrow & | \\ CHO & & CH_3 & & CH_2OH & & CHO \\ \text{Glyoxal} & & & & \text{Glycolsäure} & & \text{Glyoxalsäure} \end{array}$$

$$\rightarrow \begin{array}{c} COOH \\ | \\ COOH \\ \text{Oxalsäure.} \end{array}$$

Behandelt man den Alkohol mit überschüssiger Salpetersäure bei Gegenwart von Quecksilber, so wird Knallquecksilber erhalten (Quecksilberfulminat, das Quecksilbersalz der Knallsäure CNOH).

Chlor und Brom wirken oxydierend und gleichzeitig substituierend ein und es bildet sich Chloral $CCl_3.CHO$ oder Bromal $CBr_3.CHO$. Jod bei Gegenwart von Alkali erzeugt Jodoform CHJ_3. Der Alkoholdampf ist bei höherer Temperatur ziemlich beständig. Leitet man ihn über glühenden Zinkstaub, so zerfällt er in Wasserstoff, Kohlenoxyd und Methan

$$C_2H_5OH = H_2 + CO + CH_4$$

Zum Nachweis des Aethylalkohols bedient man sich meistens der Jodoformreaktion von Lieben. Durch Erwärmen mit ein wenig verdünnter Kalilauge und etwas Jod entsteht ein gelber Niederschlag von charakteristischem Geruch (Jodoform). Doch zeigen einige andere Körper diese Reaktion auch (Aceton, Isopropylalkohol, Aldehyd). Man kann den Nachweis auch so führen, daß man zur zu prüfenden Flüssigkeit unter gelindem Erwärmen etwas Benzoylchlorid und Kalilauge oder auch Chromsäure hinzugibt. Im erst n Falle entsteht Benzoesäureester, im zweiten Acetaldehyd, beides Substanzen von charakteristischem Geruch.

Alkoholate. Natriumalkoholat $Na.OC_2H_5$ ist ein weißes Pulver, das in Alkohol löslich, in Aether und Benzol unlöslich ist und von Wasser in NaOH und Alkohol zersetzt wird. Man stellt es dar durch Auflösen von metallischem Natrium in Alkohol, Abdestillieren der Flüssigkeit und Erhitzen des Rückstandes im Wasserstoffstrom auf 200^0. Es läßt sich auch erhalten, wenn man zu einer mit berechneten Mengen Natrium versetzten Aetherlösung Alkohol hinzufügt. Natriumäthylat ist eines der wichtigsten und meist angewendeten Kondensationsmittel bei organischen Synthesen, da es leicht Wasser und Alkohol abspaltet. An der Luft wird das Alkoholat bald braun durch Oxydation. Von anderen Alkoholaten sei noch das Calcium-, Barium- und Aluminiumalkoholat erwähnt. Letzteres ist im Vacuum unzersetzt flüchtig.

Propylalkohole $C_3H_7.OH$. Es existieren zwei Propylalkohole und ihre Konstitution ergibt sich aus ihrem Verhalten bei der Oxydation. Bei dem einen Alkohol entsteht Propionaldehyd $CH_3.CH_2.CHO$ oder Propionsäure $CH_3.CH_2.COOH$, bei dem anderen Aceton $CH_3.CO.CH_3$. Demnach ist der erste ein primärer Alkohol: Normalpropylalkohol $CH_3.CH_2.CH_2.OH$, der zweite ein sekundärer: Isopropylalkohol $\genfrac{}{}{0pt}{}{CH_3}{CH_3}\!\!> CH{-}OH$.

Der normale Propylalkohol ist ein Nebenprodukt der Alkoholgärung und wird aus

dem Fuselöl durch fraktionierte Destillation gewonnen. Er ist eine dem Aethylalkohol sehr ähnliche Flüssigkeit Sdp 97,4°, d^{20} 0,8044. Man kann ihn in den isomeren Isopropylalkohol überführen, indem man ihn durch Schwefelsäure in Propylen verwandelt, an dieses Jodwasserstoff addiert, und aus dem Reaktionsprodukt (Isopropyljodid) durch Kochen mit Wasser den Alkohol herstellt

$CH_3.CH_2.CH_2OH \rightarrow CH_3.CH=CH_2 \rightarrow$ (Propylen)

$CH_3.CHJ.CH_3 \rightarrow CH_3.CHOH.CH_3$.
Isopropyljodid — Isopropylalkohol

Der Isopropylalkohol (Dimethylcarbinol) kommt im Fuselöl nicht vor. Er läßt sich darstellen durch Reduktion von Aceton, ferner vermittels der Grignardschen Reaktion aus Acetaldehyd und Methylmagnesiumjodid. Am leichtesten wird er erhalten aus Glycerin, welches man durch Jodphosphor zunächst in Isopropyljodid und dann durch Kochen mit Bleiglätte und Wasser in den Alkohol überführt. Sehr bemerkenswert ist ferner die Entstehung des Isopropylalkohols neben dem primären Alkohol bei Behandlung des n-Propylamins mit salpetriger Säure. Der Siedepunkt des Isopropylalkohols liegt bei 82,7°, seine Dichte bei 20° beträgt 0,7887.

Butylalkohole $C_4H_{10}O$. Die vier theoretisch möglichen Butylalkohole sind alle bekannt. Es existieren zwei primäre, ein sekundärer und ein tertiärer Alkohol.

1. Normalbutylalkohol (n-Propylcarbinol) $CH_3.CH_2.CH_2.CH_2OH$, Sdp. 116,8°, d^{20} 0,8099, kann gewonnen werden durch Reduktion von Butyraldehyd, ferner aus Aethylenoxyd $CH_2—CH_2$ (über O verbunden) und Aethylmagnesiumbromid. In reichlicher Menge (6—8%) wird der Alkohol auch bei der Gärung von Glycerinlösungen durch Schizomyceten erhalten.

2. Sekundärer Butylalkohol (Methyläthylcarbinol) $CH_3.CH_2.\overset{*}{C}H(OH).CH_3$, Sdp. 99°, d^{20} 0,8270 wird hauptsächlich dargestellt durch Reduktion des Aethylmethylketons $C_2H_5.CO.CH_3$ durch Natrium und Wasser. Er entsteht auch bei der Behandlung des Erythrits mit Jodwasserstoff und Verseifen des gebildeten Produkts $CH_3.CHJ.CH_2.CH_3$. Der Alkohol enthält ein asymmetrisches Kohlenstoffatom (mit * bezeichnet) und gibt bei Behandlung mit Schwefelsäure Butylen $CH_3.CH=CH.CH_3$.

3. Isobutylalkohol (Isopropylcarbinol) $\frac{CH_3}{CH_3}{>}CH.CH_2OH$, Sdp. 108,4°, d^{20} 0,8020, ist der wichtigste Butylalkohol. Er findet sich in erheblicher Menge im Fuselöl (besonders in dem des Kartoffelspiritus) und wird daraus gewonnen. Durch Oxydation entsteht aus ihm Isobuttersäure $\frac{CH_3}{CH_3}{>}CH.COOH$, woraus sich seine Konstitution ergibt. Er hat einen unangenehmen Geruch und geht bei der Behandlung mit Schwefelsäure in Isobutylen über

$$\frac{CH_3}{CH_3}{>}CH=CH_2.$$

4. Tertiärer Butylalkohol (Trimethylcarbinol) $(CH_3)_3.COH$, Fp. + 25°, Sdp. 83°, d^{20} 0,7788, ist der erste Repräsentant der von Kolbe vorausgesagten tertiären Alkohole. Man gewinnt ihn aus Aceton und Methylmagnesiumjodid. Er läßt sich auch aus dem Isobutylalkohol über das Isobutylen durch Wasseranlagerung oder durch Addition von HJ und darauf folgende Verseifung gewinnen. Der Alkohol zeigt anomales Verhalten bei der Oxydation, indem er Isobuttersäure bildet. Dies ist wohl so zu erklären, daß der Alkohol Wasser abspaltet und in Isobutylen $\frac{CH_3}{CH_3}{>}CH=CH_2$ übergeht, dieses durch Wasseranlagerung sich in Isobutylalkohol verwandelt, welcher dann zur Säure oxydiert wird.

Amylalkohole $C_5H_{12}O$. Theoretisch sind acht Amylalkohole möglich, welche auch alle bekannt sind, nämlich vier primäre, drei sekundäre und ein tertiärer Alkohol.

1. Normaler Amylalkohol $CH_3.CH_2.CH_2.CH_2.CH_2OH$, Siedepunkt 137,8°, d^{20} 0,817.

2. Isobutylcarbinol $\frac{CH_3}{CH_3}{>}CH.CH_2.CH_2OH$ Sdp. 131,5°, d^{20} 0,810 ist der Hauptbestandteil des „Gärungsamylalkohols". Letzterer stellt ein Gemisch dieses Alkohols mit dem isomeren optisch aktiven Sekundärbutylcarbinol $\frac{CH_3.CH_2}{CH_3}{>}\overset{*}{C}H.CH_2OH$ dar und findet sich im Fuselöl. Bei der alkoholischen Gärung ist es der Alkohol, der sich neben dem Aethylalkohol in größter Menge bildet. Der Gärungsamylalkohol, auch Amylalkohol schlechthin bezeichnet (der Name stammt vom griechischen Wort ἄμυλον Stärke), ist eine bei 129 bis 131° siedende, stark lichtbrechende, ölige Flüssigkeit. Er wirkt stärker berauschend als Aethylalkohol, erzeugt Kopfschmerzen und starken Hustenreiz. Die Ebene des polarisierten Lichtes wird nach links gedreht. Der Amylalkohol wird als Lösungsmittel benutzt für Fette und Harze (Lacke). Als Ester findet er Verwendung für die Herstellung billiger Parfümeriewaren. Reiner Essigsäureamylester wird in der Photometrie als Brennmaterial für die Hefner-Altenekschen Lampen benutzt zur Erzeugung der Lichteinheit (Normalkerze).

Die Trennung der beiden im Gärungsamylalkohol enthaltenen Alkohole gelingt nur schwierig und ist erst in letzter Zeit vollständig geglückt (M a r c k w a l d 1902).

3. Sekundäres Butylcarbinol, aktiver l-Amylalkohol

$$\genfrac{}{}{0pt}{}{CH_3.CH_2}{CH_3}> \overset{*}{C}H . CH_2OH,$$

Sdp 128,7°, d^{20} 0,816, Drehungsvermögen $[\alpha]^{20}_D$ — 5,90°, ist der optisch aktive Bestandteil des „Gärungsamylalkohols“. Durch Erhitzen (mit Natriumhydroxyd) auf 200° erfolgt Razemisierung. Die entstandene inaktive Modifikation wird durch Spaltpilze wieder in aktiven Alkohol — jetzt aber r e c h t s drehenden — übergeführt. Synthetisch gewinnt man den inaktiven Alkohol aus sekundärem Butylmagnesiumbromid und Trioxymethylen.

4. Tertiärbutylcarbinol $(CH_3)_3.C.CH_2OH$, Fp + 49°, Sdp 112°, entsteht durch Reduktion von Trimethylessigsäure $(CH_3)_3$ C.COOH (oder deren Chlorid) mit Natriumamalgam.

5. Diäthylcarbinol $\genfrac{}{}{0pt}{}{CH_3.CH_2}{CH_3.CH_2} > CH . OH$, Sdp 116°, wird gewonnen aus Aethylmagnesiumjodid und Ameisensäureester

$$H.COOC_2H_5 + 2\,Mg\Big\langle{}^{C_2H_5}_{J}$$

$$= H.C\Big\langle{}^{OMgJ}_{C_2H_5}{}_{C_2H_5} + Mg\Big\langle{}^{OC_2H_5}_{J}$$

$$H.C\Big\langle{}^{OMgJ}_{C_2H_5}{}_{C_2H_5} + HOH = H.C\Big\langle{}^{OH}_{C_2H_5}{}_{C_2H_5}$$

$$+ Mg < {}^{OH}_{J}$$

6. Methylnormalpropylcarbinol $CH_3.CH_2.CH_2.{}^*CH(OH).CH_3$, Sdp 118,5° und

7. Methylisopropylcarbinol

$$\genfrac{}{}{0pt}{}{CH_3}{(CH_3)_2CH}>\overset{*}{C}HOH,\ \text{Sdp } 112{,}5^0$$

werden durch Reduktion der zugehörigen Ketone (des Methylpropylketons oder des Methylisopropylketons) gewonnen. Der erste Alkohol kann durch eine Aussaat von P e n i c i l l i u m g l a u c u m optisch aktiv gemacht werden, indem der Pilz die rechtsdrehende Modifikation zerstört und die linksdrehende übrig bleibt (L e B e l 1879).

8. Tertiärer Amylalkohol, Dimethyläthylcarbinol

$$\begin{matrix} CH_3\diagdown \\ CH_3\text{—}C.OH, \\ CH_3.CH_2\diagup \end{matrix}\quad \text{Fp —12°, Sdp +102,5°,}$$

ist eine Kampfer ähnlich riechende Flüssigkeit. Zur Darstellung geht man vom Gärungsamylalkohol aus, der durch Wasserabspaltung (mittels Chlorzink) Amylen C_5H_{10} bildet. Letzteres besteht hauptsächlich aus Trimethyläthylen $\genfrac{}{}{0pt}{}{CH_3}{CH_3}>C = CH.CH_3$, welches durch Schütteln mit mäßig verdünnter Schwefelsäure wieder Wasser addiert und so Dimethyläthylcarbinol liefert. Der Alkohol wird als Schlafmittel verwendet unter der Bezeichnung „Amylenum hydratum“, „Amylenhydrat“ — ein Name, der sich auf die Darstellung aus Amylen bezieht.

Bei den nun folgenden höheren Homologen der einwertigen Alkohole wird die Anzahl der theoretisch möglichen Isomeren immer größer. So lassen sich 17 isomere Hexylalkohole $C_6H_{14}O$, 38 Heptylalkohole $C_7H_{16}O$ voraussehen. Diese Alkohole sind aber nicht mehr alle bekannt. Je länger die Kohlenstoffkette, desto geringer wird die Anzahl der bekannten Alkohole; so sind bis jetzt nur 14 Hexylalkohole, 13 Heptylalkohole dargestellt. Indessen haben die höheren Alkohole nur wenig wissenschaftliche, noch weniger praktische Bedeutung. Es sollen deshalb im folgenden auch nur die wichtigeren genannt werden. Meistens handelt es sich um normale Alkohole, die im Pflanzen- oder Tierreich vorkommen.

H e x y l a l k o h o l e $C_6H_{13}.OH$. Normaler H e x y l a l k o h o l (Hexanol 1) $CH_3.CH_2.CH_2.CH_2.CH_2.CH_2OH$, Sdp 157° findet sich im ätherischen Oel des Samens von H e r a c l e u m g i g a n t e u m als Ester. P i n a k o l i n a l k o h o l $(CH_3)_3.C.CH(OH).CH_3$ (2,2-Dimethylbutanol 3) Fp + 4°, Sdp 120° aus dem Pinakolin $(CH_3)_3.C.CO.CH_3$ durch Reduktion mit Natriumamalgam erhältlich.

Normaler H e p t y l a l k o h o l $C_7H_{15}.OH$ (Heptanol 1), Sdp 175°, läßt sich durch Reduktion von Oenanthol $C_6H_{13}.CHO$ darstellen. Letzteres ist der normale Aldehyd der Heptanreihe und wird aus Ricinusöl durch Destillation gewonnen.

Normaler O c t y l a l k o h o l $C_2H_{17}OH$.(Octanol 1) kommt als Ester im Oel von H e r a c l e u m s p o n d y l i u m, H e r a c l e u m g i g a n t e u m und P a s t i n a c a s a t i v a vor, und kann daraus durch Verseifung gewonnen werden. Bei der Oxydation entsteht normale Caprylsäure.

Normaler N o n y l a l k o h o l (Nonanol 1) $C_9H_{19}OH$, Fp —5°, Sdp 213° d_0 0,842 ist als Ester in den Schalen süßer Pomeranzen enthalten.

Normaler D e c y l a l k o h o l (Decanol 1) $C_{10}H_{21}OH$, Fp + 7°, Sdp 231°, d_0 0,839.

Normaler U n d e c y l a l k o h o l (Undecanol 1) $C_{11}H_{23}OH$, Fp 19°, Sdp (15 mm) 131°.

Normaler D o d e c y l a l k o h o l (Dodecanol 1) $C_{12}H_{25}(OH)$, Fp24°, Sdp (15 mm) 143°.

Normaler T r i d e c y l a l k o h o l (Tridecanol) $C_{13}H_{27}(OH)$, Fp 30,5°, Sdp (15 mm) 156°.

Normaler T e t r a d e c y l a l k o h o l

(Tetradecanol 1) $C_{14}H_{29}(OH)$, Fp 38°, Sdp (15 mm) 167°.

Normaler Pentadecylalkohol (Pentadecanol 1) $C_{15}H_{31}(OH)$, Fp 46°.

Normaler Hexadecylalkohol Cetylalkohol, Fp 49,5°, Aethal (Hexadecanol 1) $C_{16}H_{33}(OH)$, weiße kristallinische Masse, findet sich im Wallrat als Palmitinsäureester $C_{15}H_{31}.COO.C_{16}H_{33}$. Durch Verseifen mit alkoholischer Kalilauge wird er daraus gewonnen (Chevreul 1818). Durch Oxydation geht er in Palmitinsäure $C_{15}H_{31}.COOH$ über.

Von den höheren Alkoholen sind nur noch 2 bemerkenswert, die sich beide in den Wachsarten finden:

Cerylalkohol, Cerotin, $C_{26}H_{53}OH$, Fp 79°, bildet teils frei, teils als Cerotinsäureester $C_{25}H_{51}.COO.C_{26}H_{53}$ den Hauptbestandteil des chinesischen Wachses und läßt sich durch Verseifung desselben darstellen. In der Kalischmelze geht der Alkohol unter Wasserstoffentwickelung in Cerotinsäure über

$$C_{25}H_{51}.CH_2OH + KOH = C_{25}H_{51}.COOK + 2H_2$$

Melissylalkohol, Myricylalkohol $C_{30}H_{61}OH$, Fp 85°, d_{35} 0,807, ist im Bienenwachs als Palmitinsäureester enthalten. Besitzt wahrscheinlich normale Struktur in Analogie zu anderen in der Natur vorkommenden hochmolekularen Verbindungen der Fettreihe, welche fast alle normale Konstitution haben.

b) Ungesättigte Alkohole.
α) Alkohole mit Aethylenbindung. Diese Alkohole zeigen außer den gewöhnlichen Reaktionen der OH-Gruppe noch die der Doppelbindungen.

Vinylalkohol (Aethenol)

$$CH_2{=}CH.OH$$

ist in reiner Form noch nicht isoliert worden. Er befindet sich aber stets in kleiner Menge im gewöhnlichen Aethyläther und kann daraus durch Schütteln mit einer alkalischen Quecksilberoxychloridlösung (Mischung von Quecksilberchlorid und Kaliumbicarbonatlösung) in Form eines weißen Niederschlags von der Zusammensetzung $Hg_3Cl_2O_2C_2H_3$ abgeschieden werden (Ber. 22. 2863). Bei dem Versuch aus dieser Quecksilberverbindung den freien Alkohol zu isolieren, trat immer der isomere Acetaldehyd

$$CH_3{-}C\begin{matrix}{\nearrow}O\\ \searrow H\end{matrix}$$ auf.

Auch bei ähnlich konstituierten Verbindungen findet eine solche Atomverschiebung statt, so daß man allgemein sagen kann: die Atomgruppe $\begin{matrix}R\\R\end{matrix}{>}C=C{<}\begin{matrix}H\\OH\end{matrix}$ hat das Bestreben, in die Gruppierung $\begin{matrix}R\\R\end{matrix}{>}C-C{<}\begin{matrix}H\\O\end{matrix}$ sich umzulagern (Erlenmeyersche Regel). Von dieser Regel gibt es jedoch Ausnahmen (z. B. Oxymethylenketone).

Der Vinylalkohol entsteht im Aether wahrscheinlich gleichzeitig mit Wasserstoffsuperoxyd unter dem Einfluß der atmosphärischen Luft. Ist der Alkohol selber noch nicht bekannt, so leiten sich doch eine Reihe wohlcharakterisierter Derivate von ihm ab: die Vinylhalogenide, Divinyläther $CH_2{=}CH.O.CH{=}CH_2$, Divinylsulfid u. a. Das wichtsigte Derivat, welches die Vinyl-Gruppe enthält, ist das Neurin

$$\begin{matrix}CH_3\\CH_3\\CH_3\end{matrix}{\equiv}N{<}\begin{matrix}CH_2{=}CH_2,\\ OH\end{matrix}$$

eine Base, welche bei der Fäulnis des Fleisches und anderen fermentativen Spaltungen von Eiweißarten entsteht, und sich auch im Blut und im normalen Harn findet.

Allylalkohol (Propenol 3)

$$CH_2{=}CH.CH_2OH$$

ist der wichtigste ungesättigte Alkohol. Er findet sich in Form von schwefelhaltigen Derivaten im Knoblauchöl und im Senföl, in kleiner Menge auch im Holzgeist. Man kann ihn darstellen durch Kochen des Allyljodids $CH_2 = CH.CH_2J$ (aus Glycerin erhältlich), mit Wasser und auch durch Reduktion des einfachsten ungesättigten Aldehyds, des Acroleins

$$CH_2{=}CH.C\begin{matrix}{\nearrow}H\\ \searrow O\end{matrix}$$

Die gewöhnliche Darstellungsweise besteht im Erhitzen von Glycerin mit Oxalsäure. Bei dieser Reaktion (die auch in etwas modifizierter Form zur Darstellung von Ameisensäure verwendet wird), entsteht zunächst Glycerinmonooxalsäureester, der beim Erhitzen auf etwa 130° Kohlendioxyd verliert und in Glycerinmonoameisensäureester übergeht.

$$\begin{matrix}CH_2.OH\\ |\\ CH.OH\\ |\\ CH_2.OH\\ \text{Glycerin}\end{matrix} + \begin{matrix}COOH\\ |\\ COOH\\ \text{Oxalsäure}\end{matrix} \rightarrow \begin{matrix}CH_2.OOC.COOH\\ |\\ CH.OH\\ |\\ CH_2.OH\end{matrix} \rightarrow \begin{matrix}CH_2.OOC.H\\ |\\ CH.OH\\ |\\ CH_2OH\end{matrix}$$

Letzterer gibt bei höherem Erhitzen (über 200°) Kohlendioxyd und Wasser ab und es destilliert jetzt der Amylalkohol über

$$\begin{matrix}CH_2.OOC.H\\ |\\ CH.OH\\ |\\ CH_2.OH\\ \text{Glycerinameisen-}\\ \text{säureester}\end{matrix} = \begin{matrix}CH_2\\ \|\\ CH\\ |\\ CH_2OH\\ \text{Allylalkohol}\end{matrix} + CO_2 + H_2O$$

Der Allylalkohol ist eine farblose, bewegliche Flüssigkeit von stechendem Geruch. Fp —50°, Sdp 96,6°, d^{20} 0,8540. Er brennt mit leuchtender Flamme und ist mit Wasser in jedem Verhältnis mischbar. Aus den wässerigen Lösungen kann man ihn wieder abscheiden durch Zufügen von Pottasche.

Die Oxydation des Allylalkohols kann in zwei Richtungen verlaufen. Entweder reagiert die CH_2OH-Gruppe oder die Doppelbindung. So entsteht bei der Oxydation mit Silberoxyd Acrolein oder Acrylsäure: $CH_2{=}CH.COOH$, beim Behandeln mit Kaliumpermanganat (unter gleichzeitiger Wasseraddition) Glycerin. Halogene wirken teils oxydierend, teils addierend. So liefert Chlor Acrolein und auch das Dichlorhydrin des Glycerins: $CH_2Cl.CHCl.CH_2OH$. Die Reduktion führt zu n-Propylalkohol. Quecksilbersalze werden addiert und bilden schwer lösliche Niederschläge.

β-Allylalkohol $CH_2 = C(OH).CH_3$ ist ebenso wie der Vinylalkohol nicht beständig. Statt seiner bildet sich stets das isomere Aceton $CH_3.CO.CH_3$. Doch scheint ein Natriumsalz (Natrium *β*-Allylalkoholat) existenzfähig zu sein. Es bildet sich als Hauptbestandteil bei der Einwirkung von Natrium auf Aceton in trockenem Aether.

Die höheren Homologen der Olefinalkohole sind mannigfach durch Synthese mit Magnesiumalkylhaloiden oder durch Reduktion der entsprechenden Aldehyde erhalten worden. Besonders wichtig sind die Alkohole mit ein oder zwei Doppelbindungen, welche eine Kette von 10 Kohlenstoffatomen enthalten. Sie gehören zu der großen Klasse der olefinischen Terpenkörper und werden bei den Terpenen abgehandelt (vgl. den Artikel „Terpene"). Zu ihnen gehört das Citronellol

$$\begin{matrix}CH_3\\CH_2\end{matrix}\!\!>\!C.CH_2.CH_2.CH_2\underset{\displaystyle CH_3}{\underset{|}{C}H}.CH_2.CH_2(OH),$$

ferner das Rhodinol, Geraniol

$$\begin{matrix}CH_3\\CH_3\end{matrix}\!\!>\!C{=}CH.CH_2.CH_2.\underset{\displaystyle CH_3}{\underset{|}{C}}{=}CH.CH_2(OH),;\ \text{sowie}$$

Nerol, Linalool u. a. Von den noch höheren Homologen seien noch erwähnt:

Oleinalkohol (Octadecen-9-ol 1) $C_{18}H_{36}O$, $CH_3.(CH_2)_7.CH{=}CH(CH_2)_7.CH_2OH$ aus Oelsäureester durch Reduktion gewonnen. Zähe Flüssigkeit. Sdp 200°, bei 13 mm Druck, d^0 0,862.

Phytol $C_{20}H_{40}O$ (vielleicht auch $C_{18}H_{38}O$), als Ester im Chlorophyll enthalten. Willstätter (Annalen 354, 205, 1907) isolierte aus dem Blattgrün eine wachsähnliche Masse, das Phäophytin, welches bei der Verseifung mit alkoholischem Alkali neben komplizierten sauren (stickstoffhaltigen) Bestandteilen den genannten Alkohol lieferte, und zwar in ziemlich gleicher Ausbeute aus dem Chlorophyll der verschiedensten Pflanzen. Das Phytol ist ein farbloses dickes Oel, das bei sehr stark vermindertem Druck unzersetzt destilliert, Sdp 145° bei 0,03 mm Druck, d^0 0,864. Der Alkohol zersetzt sich beim Erhitzen unter Abspaltung von Wasser und bildet einen ungesättigten Kohlenwasserstoff Phytadien. Die Doppelbindung des Alkohols verrät sich durch glatte Addition von Brom. Das Natriumsalz des Phytols ist in Aether leicht löslich.

β) Alkohole mit Acetylenbindung. Propargylalkohol (Propinol 3) $CH{\equiv}C.CH_2OH$ ist von Henry aus Glycerin hergestellt. Letzteres liefert über das Tribrompropan $CH_2Br.CHBr.CH_2Br$ den Bromallylalkohol, welcher durch Kalilauge infolge Bromwasserstoffabspaltung in den Propargylalkohol übergeht

$$\underset{\text{Bromallylalkohol}}{CH_2{=}CBr{-}CH_2OH} = \underset{\text{Propargylalkohol}}{CH{\equiv}C{-}CH_2OH} + HBr$$

Der Propargylalkohol ist eine farblose, bewegliche Flüssigkeit, von angenehmem Geruch, Fp —17°, Sdp 114° bis 115°, d^{21}, 0,963. Er ist mit Wasser mischbar und gibt wie das Acetylen explosive Metallverbindungen (CuC_3H_3O gelb aus ammoniakalischer Kupferchlorürlösung, AgC_3H_3O weiß aus ebensolcher Silbernitratlösung). Halogene und Halogenwasserstoff werden von dem Alkohol leicht addiert.

c) Zweiwertige Alkohole; Glycole. Zweiwertige Alkohole, welche beide Hydroxylgruppen an einem Kohlenstoffatom tragen (1,1-Glycole), sind nicht existenzfähig. Sie spalten Wasser ab und gehen in Aldehyde (vgl. den Artikel „Aldehyde") über

$$CH_3.CH\!<\!\begin{matrix}OH\\OH\end{matrix} = CH_3.CHO + H_2O.$$

Dagegen sind äther- oder esterartige Derivate dieser Alkohole ganz beständig. Sie entstehen durch Addition von Alkoholen oder Säureanhydriden an Aldehyde. Die Alkylderivate dieser Art nennt man „Acetale" (vgl. den Artikel „Aether").

Stehen die beiden Hydroxyl-Gruppen an verschiedenen Kohlenstoffatomen, erhält man die eigentlichen Glycole. Je nachdem die Hydroxylgruppen an benachbarten Kohlenstoffatomen oder entfernter stehen, unterscheidet man 1,2- oder 1,3-, 1,4-, 1,5-Glycole oder auch *α*-, *β*-, *γ*-, *δ*-Glycole. Nach den Genfer Nomenklaturvorschlägen werden die Namen der zweiwertigen Alkohole durch Anhängung der Silbe -diol an den Namen des Kohlenwasserstoffs gebildet, in dem die Stellung der Hydroxylgruppen durch Zahlen angegeben wird, z. B. $CH_2OH.CH_2.CH_2OH$ 1,3-Propandiol.

Die Bildungsweisen der Glycole sind im

allgemeinen dieselben wie die der einfachen Alkohole (s. o.), nur muß man natürlich darauf achten, daß der Ausgangskörper zwei hydroxylliefernde Gruppen enthält. So entstehen Glycole durch Verseifung von Dihalogenalkylen, durch Behandeln von Diaminen mit salpetriger Säure, durch Reduktion von Oxyaldehyden, Oxyketonen, Dialdehyden, Diketonen, Oxysäuren, oder Dicarbonsäuren und deren Derivaten. Magnesiumhalogenalkyle ergeben mit Diketonen, Ketonsäureestern und Dicarbonsäureestern Glycole, z. B.

$$\begin{array}{l} CH_3.CO \\ | \\ CH_3.CO \end{array} + 2\,CH_3MgJ \rightarrow \begin{array}{l} CH_3 \\ CH_3{-}C{-}OH \\ \quad | \\ CH_3{-}C{-}OH \\ CH_3 \end{array}$$

Eine besondere Bildungsweise für die zweiwertigen Alkohole ist die Addition von Wasser an die Olefine bei Gegenwart von Oxydationsmitteln (Kaliumpermanganat in alkalischer Lösung, Wasserstoffsuperoxyd)

$$\begin{array}{l} CH_2 \\ \| \\ CH_2 \end{array} + H_2O + O = \begin{array}{l} CH_2OH \\ | \\ CH_2OH \end{array}$$

Ferner entstehen Glycole bei der Reduktion von einfachen Aldehyden oder Ketonen. Aldehyde geben mit alkoholischem Kali behandelt unter gleichzeitiger Bildung von Säure zweifach sekundäre Glycole

$$3C_3H_7.CHO + KOH = C_3H_7.COOK + \begin{array}{l} C_3H_7.CH(OH) \\ \quad\quad | \\ C_3H_7.CH(OH) \end{array}$$

Aus Ketonen erhält man durch Reduktion mit Natrium zweifach tertiäre Glycole

$$2\,{}^{CH_3}_{CH_3}{>}CO + H_2 = {}^{CH_3}_{CH_3}{>}\overset{OH}{C}{-}\overset{OH}{C}{<}^{CH_3}_{CH_3}$$

Die Reaktion ist sehr charakteristisch für die Ketone, und die entstehenden Produkte haben deshalb einen besonderen Namen erhalten; man nennt diese Glycole „Pinakone".

Die Glycole sind süßlich schmeckende Substanzen, welche in Wasser leicht, in Aether nur wenig löslich sind und deren Siedepunkt weit höher (etwa 100°) als der der einfachen Alkohole liegt. Wenn die Zahl und die Größe der Alkylgruppen in den Homologen wächst, vermehrt sich die Löslichkeit in Aether, der süße Geschmack dagegen verschwindet allmählich. Durch wasserentziehende Mittel geben die 1,4- und 1,5- und zum Teil auch die 1,3-Glycole innere Anhydride, die sogenannten „Alkylenoxyde" (vgl. den Artikel „Aether"). Die 1,2-Glycole und auch einige 1,3-Glycole liefern beim Erhitzen für sich oder mit Chlorzink, Phosphorpentoxyd unter Umlagerung Aldehyde oder Ketone:

$$\begin{array}{l} CH_2OH \\ CH_2OH \end{array} \rightarrow \begin{array}{l} CHO \\ CH_3 \end{array}$$

Aethylen-Glycol → Acet-Aldehyd

$$\begin{array}{l} {}^{CH_3}_{CH_3}{>}C{-}OH \\ \quad\quad | \\ {}^{CH_3}_{CH_3}{>}C{-}OH \end{array} \rightarrow \begin{array}{l} CH_3{-}CO \\ CH_3\diagdown \;| \\ CH_3{-}C \\ CH_3\diagup \end{array}$$

Pinakon → Pinakolin

Die Umlagerung eines zweifach tertiären Glycols (Pinakons) in ein Keton (Pinakolin) vollzieht sich außerordentlich leicht und wird Pinakolin-Umlagerung genannt. Durch Oxydation entstehen aus den Glycolen mannigfache Produkte, je nachdem nur eine oder beide Hydroxylgruppen angegriffen werden. Aus Aethylenglycol können z. B. folgende Substanzen entstehen

$$\begin{array}{ccc} CH_2{-}OH & CHO & COOH \\ | & | & | \\ CH_2{-}OH & CH_2OH & CH_2OH \\ \text{Glycol} & \text{Glycolaldehyd} & \text{Glycolsäure} \\ CHO & COOH & COOH \\ | & | & | \\ CHO & CHO & COOH \\ \text{Glyoxal} & \text{Glyoxylsäure} & \text{Oxalsäure.} \end{array}$$

Halogenwasserstoffsäuren lassen aus den Glycolen die sogenannten „Halogenhydrine" hervorgehen

$$\begin{array}{l} CH_2OH \\ | \\ CH_2OH \end{array} + HCl = \begin{array}{l} CH_2Cl \\ | \\ CH_2OH \end{array} + H_2O$$

Glycol → Chlorhydrin

Aethylenglycol, auch Glycol schlechthin, 1,2-Aethandiol $CH_2(OH).CH_2(OH)$, wird erhalten durch Kochen von Aethylenbromid $CH_2Br.CH_2Br$ mit Kaliumcarbonatlösung oder besser durch Umsetzung des Aethylenbromids mit trockenem Kaliumacetat zu Glycoldiacetat, welches dann durch Verseifen mit Kali in Glycol übergeführt wird

$$\begin{array}{l} CH_2Br \\ | \\ CH_2Br \end{array} + \begin{array}{l} KOOC.CH_3 \\ \\ KOOC.CH_3 \end{array} \rightarrow \begin{array}{l} CH_2.OOC.CH_3 \\ | \\ CH_2.OOC.CH_3 \end{array}$$

$$+ 2KOH \rightarrow \begin{array}{l} CH_2OH \\ | \\ OH_2OH \end{array}$$

Das Glycol ist eine farblose Flüssigkeit, Fp. —11,5°, Sdp. 197,5°, d° 1,125, welche in Wasser und Alkohol leicht, in Aether jedoch wenig löslich ist. Beim Erhitzen mit Chlorzink oder mit Wasser über 200° verwandelt es sich in Acetaldehyd (s. o.). Die bei der Oxydation mit Salpetersäure entstehenden Produkte sind oben angeführt. Auch beim Erhitzen des Glycols mit festem Kali auf etwa 250° wird unter Wasserstoffentwickelung reichlich Oxalsäure gebildet. Erhitzen mit Salzsäure auf 160° liefert Chlorhydrin

$$CH_2Cl.CH_2OH,$$

bei noch höherer Temperatur entsteht Aethylenchlorid $CH_2Cl.CH_2Cl$. Konzentrierte Schwefelsäure gibt mit Glycol Glycolschwefelsäure $CH_2(OH).CH_2O.SO_3H$. Das Salpetersäureester des Glycols

$$CH_2(ONO_2).CH_2(ONO_2),$$

Glycoldinitrat, wird hergestellt durch Behandeln mit Salpetersäure - Schwefelsäure-Gemisch und ist eine gelbe explosive Flüssigkeit, welche Aehnlichkeit mit Nitroglycerin hat. Vom Glycol leiten sich verschiedene Reihen Aether ab, je nachdem nur eine Hydroxylgruppe in Reaktion getreten ist (z. B. $CH_2OH.CH_2OCH_3$, oder alle beide, $CH_2OCH_3.CH_2OCH_3$, oder ein Ringschluß stattgefunden hat

$$\begin{matrix} CH_2 \\ | \\ CH_2 \end{matrix} \!\!>\! O, \quad \begin{matrix} CH_2-O-CH_2 \\ | \qquad\quad | \\ CH_2-O-CH_2. \end{matrix}$$

Die letzteren Aether, welche auch „innere" Aether oder Alkylenoxyde genannt werden, zeichnen sich durch merkwürdiges Verhalten und große Reaktionsfähigkeit aus (vgl. den Artikel „Aether").

1,2-Propylenglycol $CH_3.CH(OH).CH_2OH$ bildet sich bei der Destillation von Glycerin mit Aetznatron. Sdp 188°, d_0 1,015, in Aether wenig löslich. Durch Oxydation mittels Platinschwarz geht dieses Glycol in Milchsäure

$$CH_3.CH(OH).COOH \text{ über.}$$

1,2-Butylengylcol $CH_3.CH_2.CH(OH).CH_2OH$, Sdp 192°, d_0 1,019.

2,3-Butylenglycol $CH_3.CH(OH).CH(OH).CH_3$, Sdp 184°.

Isobutylenglycol $\frac{CH_3}{CH_3}\!>C(OH).CH_2(OH)$, Sdp 177°, d^0 1,013.

2,3-Amylenglycol $CH_3.CH_2.CH(OH).CH(OH).CH_3$, Sdp 187,5°, d^0 0,9945.

Pinakon, Tetramethyläthylenglycol $\frac{CH_3}{CH_3}\!>C(OH).C(OH)\!<\frac{CH_3}{CH_3}$ Fp 38°, Sdp 171° bis 172°, kristallisiert aus Wasser in quadratischen Tafeln (πίναξ Tafel), welche 6 Mol Kristallwasser enthalten und bei 42° schmelzen. Durch Erwärmen mit verdünnter Salzsäure oder Schwefelsäure geht das Pinakon unter Wasserabspaltung und Umlagerung in Pinakolin über (s. o.)

$$\frac{CH_3}{CH_3}\!>C(OH).C(OH)\!<\frac{CH_3}{CH_3} =$$

$$CH_3.CO.C\!\begin{matrix} CH_3 \\ CH_3 \\ CH_3 \end{matrix} + H_2O$$

Trimethylenglycol, 1,3-Propylenglycol $CH_2(OH).CH_2.CH_2(OH)$ bildet sich durch Verseifung von Trimethylenbromid $CH_2Br.CH_2.CH_2Br$, ferner in bedeutender Menge bei der Schizomycetengärung des Glycerin. Sdp 216°, d^0 1,065. Bei Erhitzen mit wasserentziehenden Mitteln entsteht unter Umlagerung gleichzeitig Propionaldehyd $CH_3.CH_2.CHO$ und Aceton $CH_3.CO.CH_3$.

1,3-Butylenglycol $CH_3.CH(OH).CH_2.CH_2(OH)$, Sdp 207° bis 208°, d^0 1,026.

Tetramethylenglycol, 1,4-Butylenglycol $CH_2(OH).CH_2.CH_2.CH_2(OH)$, Sdp 202° bis 203°, d 1,011.

1,4-Pentylenglycol $CH_3.CH(OH).CH_2.CH_2.CH(OH)$, Sdp 220°, d^0 1,000.

2,5-Hexylenglycol

$$CH_3.CH(OH).CH_2.CH_2.CH(OH).CH_3,$$

Sdp 217°, d^0 0,964, entsteht durch Reduktion von Acetonylaceton

$$CH_3.CO.CH_2.CH_2.CO.CH_3.$$

Pentamethylenglycol, 1,5 Pentylenglycol $CH_2(OH).CH_2.CH_2.CH_2.CH_2(OH)$, Sdp 239°, d^{10} 0,994.

1,5-Hexylenglycol $CH_3.CH(OH).CH_2.CH_2.CH_2(OH)$, Sdp 235°, d^0 0,981.

Hexamethylenglycol $CH_2(OH).CH_2.CH_2.CH_2.CH_2.CH_2(OH)$, Fp 42°, Sdp 250°.

Heptamethylenglycol $CH_2(OH).(CH_2)_5.CH_2(OH)$, bisher nur als Diäthyläther bekannt, welcher bei 225° siedet.

Octomethylenglycol $CH_2(OH).(CH_2)_6.CH_2OH$, Fp 60°, Sdp_{10} 162°.

Enneamethylenglycol $CH_2(OH).(CH_2)_7.CH_2OH$, Fp 45°, Sdp_{15} 177°.

Dekamethylenglycol $CH_2OH(CH_2)_8.CH_2OH$, Fp 70°, Sdp_{15} 179°.

Höhere Homologen der Glycole finden sich in Wachsarten vor. Carnaubawachs enthält ein Glycol $CH_2OH(CH_2)_{23}CH_2OH$, welches bei 103,5° schmilzt. Im Coccerin (Cochenille) findet sich ein Glycol $C_{30}H_{60}(OH)_2$, Fp 101° bis 104°, welcher Coccerylalkohol genannt wird.

Halogenhydrine. Vom Glycol und den anderen mehrwertigen Alkoholen leiten sich durch Ersatz eines Hydroxyls durch Halogen die „Halogenhydrine" ab $CH_2OH.CH_2.Hal$. Sie entstehen 1. durch Erhitzen der Glycole mit Salzsäure oder Bromwasserstoffsäure, 2. durch Addition von unterchloriger Säure an ungesättigte Kohlenwasserstoffe:

$$CH_2{=}CH_2 + ClOH = CH_2Cl.CH_2OH.$$

3. Durch Addition von Halogen an ungesättigte Alkohole $CH_2 = CH.CH_2(OH) + J_2 = CH_2J.CHJ.H_2OH$. 4. Durch Addition von Halogenwasserstoff an die Alkylenoxyde.

$$\begin{matrix} CH_2 \\ | \\ CH_2 \end{matrix} \!\!>\! O + HCl = \begin{matrix} CH_2Cl \\ | \\ CH_2OH \end{matrix}$$

5. Aus Halogenketonen und Halogencarbonsäureestern mittels Magnesiumalkylhaloiden

$$CH_3.CO.CH_2Cl + Mg\Big\langle{}^{CH_3}_{J} = CH_3-\overset{\displaystyle CH_3}{\underset{\displaystyle O.MgJ}{\overset{|}{\underset{|}{C}}}}-CH_2Cl$$

$$\rightarrow (CH_3)_2.C(OH)-CH_2Cl.$$

Die Halogenhydrine sind sehr reaktionsfähige Substanzen. Durch Oxydation entstehen aus ihnen Halogenfettsäuren

$$\underset{\text{Chlorhydrin}}{\begin{matrix} CH_2.OH \\ | \\ CH_2Cl \end{matrix}} \longrightarrow \underset{\text{Monochloressigsäure.}}{\begin{matrix} COOH \\ | \\ CH_2.Cl \end{matrix}}$$

Bei der Reduktion wird das Halogen durch Wasserstoff ersetzt und es entstehen Alkohole von niederer Wertigkeit, aus den Halogenhydrinen der Glycole z. B. die primären Grenzalkohole. Alkalien führen die Halogenhydrine in Alkylenoxyde über

$$\begin{matrix} CH_2Cl \\ | \\ CH_2OH \end{matrix} + KOH = \begin{matrix} CH_2 \\ | \\ CH_2 \end{matrix}\Big\rangle O + KCl.$$

Mit Cyankalium reagieren sie unter Bildung der Nitrile von Oxysäuren: $CH_2OH.CH_2Cl + KCN = CH_2OH.CH_2.CN + KCl$. Aehnlich treten die Halogenhydrine mit Salzen organischer Säuren zu basischen Glycolestern zusammen

$$CH_2OH.CH_2Cl + KOOC.CH_3 = CH_2OH.CH_2.OOC.CH_3 + KCl$$

Glycolchlorhydrin, Aethylenchlorhydrin, Chloräthylalkohol $CH_2OH.CH_2Cl$, farblose, in Wasser lösliche Flüssigkeit, Sdp 128°, d^0 1,223.

Glycolbromhydrin $CH_2OH.CH_2Br$, Sdp 150°, d^8 1,66.

Glycoljodhydrin $CH_2OH.CH_2J$ wird hergestellt durch Erwärmen des Chlorhydrins mit Jodkalium, farbloses Oel, Sdp_{16} 78°, d^{19} 2,165, welches durch Bleihydroxyd beim Erwärmen in Acetaldehyd übergeführt wird.

Trimethylenglycolchlorhydrin $CH_2Cl.CH_2.CH_2OH$, Sdp 160°.

1,2-Propylenglycolchlorhydrin $CH_2Cl.CH(OH).CH_3$, Sdp 127°.

Isobutylenglycolchlorhydrin

$$CH_2Cl.C(OH)\Big\langle{}^{CH_3}_{CH_3}, \text{ Sdp } 129°.$$

d) Dreiwertige Alkohole. Glycerine. Glycerin, Oelsüß, 1,2,3-Propantriol $CH_2OH.CHOH.CH_2OH$, ist der einfachste dreiwertige Alkohol und wurde 1779 von Scheele bei der Verseifung des Olivenöls durch Bleiglätte entdeckt. Chevreul zeigte in seinen klassischen Untersuchungen über die Fette, daß dieselben esterartige Verbindungen seien, in denen das Glycerin die Rolle des Alkohols spielt (1813). Die Zusammensetzung des Glycerins wurde von Pelouze (1836) festgestellt, die Konstitution von Berthelot (1853) und Würtz (1855) ermittelt, die erste Synthese von Friedel und Silva (1872) ins Werk gesetzt.

Das Glycerin findet sich als Ester in den Fetten und fetten Oelen (Laurin, Palmitin, Myristin, Stearin, Olein). Es entsteht in kleiner Menge bei der alkoholischen Gärung des Zuckers, weshalb es in manchen vergorenen Flüssigkeiten (Wein, Bier) regelmäßig enthalten ist. Es bildet sich ferner bei der Oxydation von Allylalkohol mit Permanganat in alkalischer Lösung

$$CH_2{=}CH.CH_2OH + H_2O + O = CH_2OH.CHOH.CH_2OH$$

In großem Maßstabe wird das Glycerin als Nebenprodukt bei der Kerzen- und Seifenfabrikation erhalten. Im ersten Falle werden Fette (Rindstalg, Hammeltalg, Palmfett) durch Erhitzen mit Kalk oder Schwefelsäure oder überhitztem Wasserdampf allein verseift. Bei der Darstellung der Seifen wird die Spaltung der Fette (Talgarten, Palmfett, Kokosfett, Olivenöl) durch Kochen mit Natron- oder Kalilauge („Seifensieden") bewirkt. In beiden Fällen fällt das Glycerin in Form von wässerigen Lösungen ab, die mannigfache Verunreinigungen enthalten. Die „Glycerinwässer" werden durch Knochenkohle filtriert und dann im Vakuum eingedampft. Zur besonderen Reinigung wird das Glycerin noch mit überhitztem Wasserdampf destilliert.

Das Glycerin ist eine farblose, geruchlose, sirupöse Flüssigkeit von rein süßem Geschmack. Es ist stark hygroskopisch und mischt sich mit Wasser und Alkohol in jedem Verhältnis, ist dagegen in Aether und Chloroform unlöslich. Den Prozentgehalt wässeriger Glycerinlösungen kann man durch Bestimmung des spezifischen Gewichts ermitteln. Nachstehende Tabelle gibt die Dichten von Glycerin-Wasser-Gemischen bei 15° bezogen auf Wasser von 15° in Gewichtsprozenten an

Gew. Proz. Glycerin	d_{15}^{15}
100	1,2653
90	1,2400
80	1,2130
70	1,1850
60	1,1570
50	1,1290
40	1,1020
30	1,0750
20	1,0490
10	1,0425
5	1,0122

Das Glycerin kristalisiert sehr schwer. Wenn man es längere Zeit auf einer Temperatur von 0° hält, bilden sich glänzende, durchsichtige Kristalle, welche bei 17°

schmelzen; bei Temperaturen unter 0° erstarrt es schwerer, und bei starker Abkühlung erhält man nur gummi- oder glasähnliche Massen (Hemmung der Kristallisationsgeschwindigkeit durch tiefe Temperaturen). Das Glycerin siedet unter gewöhnlichem Druck fast unzersetzt bei 290°. Sdp_{50} 205°, Sdp_{12} 170°. d^{15} 1,265. Das Glycerin ist ein gutes Lösungsmittel für viele organische und auch anorganische Substanzen, wie Alkalien, alkalische Erden, Metalloxyde, Salze.

Durch Oxydation mittels Salpetersäure oder Quecksilberoxyd und Alkali wird Glycerin in Glycerinsäure $CH_2OH.CHOH.COOH$ und Tartronsäure $COOH.CHOH.COOH$ übergeführt, durch Salpeter und Wismutnitrat in Mesoxalsäure $COOH.CO.COOH$. Daneben entstehen je nach den Bedingungen Glycolsäure $CH_2OH.COOH$, Glyoxylsäure $CHO.COOH$ und Oxalsäure $COOH.COOH$. Bei Anwendung weniger stark wirkender Oxydationsmittel wie verdünnter Salpetersäure, Brom in Sodalösung u. a. entsteht „Glycerose", ein Gemisch von Glycerinaldehyd $CHO.CHOH.CH_2OH$ und Dioxyaceton $CH_2OH.CO.CH_2OH$, in dem letzteres überwiegt. Andere Oxydationsmittel bewirken eine Sprengung der Kohlenstoffkette: Silberoxyd bildet reichliche Mengen Glycolsäure $CH_2OH.COOH$, Bleisuperoxyd spaltet das Glycerin in Ameisensäure und Wasserstoff. Spaltpilze bewirken leicht eine lebhafte Gärung des Glycerins, welche je nach der Natur des Erregers und den äußeren Bedingungen zu ganz verschiedenen Produkten führen kann. Hefepilze lassen bei 20° bis 30° Propionsäure $CH_3.CH_2.COOH$ entstehen. *Bacillus butylicus* bewirkt Bildung von normalem Butylalkohol $CH_3.CH_2.CH_2.CH_2OH$ und Trimethylenglycol $CH_2OH.CH_2.CH_2OH$. Daneben entstehen noch als Gärungsprodukte Aethylalkohol, Ameisensäure, Milchsäure, Bernsteinsäure u. a. m. Beim Erhitzen des Glycerins mit Aetznatron erhält man Propylenglycol $CH_3.CHOH.CH_2OH$ und Milchsäure $CH_3.CHOH.COOH$ in reichlicher Menge.

Wenn man Glycerin für sich allein auf hohe Temperaturen erhitzt oder mit wasserentziehenden Substanzen, wie Phosphorpentoxyd, Chlorzink, Borsäure, Schwefelsäure oder Kaliumbisulfat destilliert, entsteht unter Wasseraustritt Acroleïn, ein ungesättigter Aldehyd, welcher sehr scharf und unangenehm riecht. Diese Reaktion findet auch beim Ueberhitzen der glycerinenthaltenden Fette und Oele statt, wovon sich der äußerst widerwärtige Geruch beim „Anbrennen" der Fette herschreibt

$$\begin{matrix} CH_2OH & & CHO \\ | & & | \\ CHOH & = & CH + 2H_2O \\ | & & | \\ CH_2OH & & CH_2 \\ \text{Glycerin} & & \text{Acroleïn} \end{matrix}$$

Die Halogenwasserstoffsäuren wirken auf das Glycerin bei höherer Temperatur unter Bildung von Halogenhydrinen ein. So entsteht mittels Chlorwasserstoff α-Monochlorhydrin $CH_2Cl.CHOH.CH_2OH$ und α-Dichlorhydrin $CH_2Cl.CHOH.CH_2Cl$. Durch Chlor- oder Bromphosphor werden schließlich alle drei Hydroxylgruppen des Glycerins durch Halogen ersetzt. Jodphosphor oder Jodwasserstoffsäure wirkt aber anders ein. Wahrscheinlich sind die zuerst entstehenden Jodhydrine nicht beständig und reagieren weiter und so entsteht schließlich Allyljodid $CH_2{=}CH.CH_2J$, Isopropyljodid $CH_3.CHJ.CH_3$ und Propylen $CH_2{=}CH.CH_3$. — Durch Erhitzen mit Oxalsäure auf 100° entsteht unter Kohlendioxydentwickelung aus Glycerin ein Glycerinameisensäureester

$$\begin{matrix} CH_2OH & HOOC & & CH_2.OOCH \\ | & | & & | \\ CHOH & + HOOC & = & CHOH + CO_2 + H_2O \\ | & & & | \\ CH_2OH & & & CH_2OH \end{matrix}$$

welcher durch das Kristallwasser der Oxalsäure wieder zerlegt wird in Ameisensäure und Glycerin (Darstellungsmethode für Ameisensäure). Erhitzt man den Glycerinameisensäureester für sich allein auf höhere Temperatur (205° bis 210°), so zerfällt er in Allylalkohol, Kohlendioxyd und Wasser (Darstellungsmethode für Allylalkohol)

$$\begin{matrix} CH_2.OOCH & & CH_2 \\ | & & \| \\ CHOH & = & CH + CO_2 + H_2O. \\ | & & | \\ CH_2OH & & CH_2OH \end{matrix}$$

Das Glycerin bildet drei Reihen von Estern, je nachdem ein oder zwei, oder alle drei Hydroxylgruppen durch organische oder anorganische Säureradikale ersetzt sind. Der wichtigste Ester ist das Glycerintrinitrat, gewöhnlich *Nitroglycerin* genannt $CH_2(O.NO_2).CH(ONO_2).CH_2(ONO_2)$, welcher durch Zusammenbringen des Glycerins mit einem Gemisch von konzentrierter Salpetersäure und konzentrierter Schwefelsäure gewonnen wird (Näheres über Nitroglycerin s. in den Artikeln „*Ester*" und „*Explosion*"). Mit Phosphorsäure verbindet sich das Glycerin zu Glycerinphosphorsäure $C_3H_5(OH)_2OPO_3H_2$, welche sich in Verbindung mit Fettsäuren und Cholin als *Lecithin*

$$\begin{matrix} CH_2.OCO_{17}H_{35} & \\ | & \\ CH.OCO_{15}H_{31} & CH_3CH_3CH_3 \\ | & \diagdown \; | \; \diagup \\ CH_2.OPO(OH).O.CH_2.CH_2 & \!\!-N-OH \end{matrix}$$

in der Gehirnsubstanz, in den Nerven, in den Blutkörperchen und im Eigelb findet.

Die Fähigkeit des Glycerins, Metalloxyde in erheblicher Menge aufzulösen, beruht auf der Bildung von Alkoholaten. Mono-

natriumglycerat $CH_2OH.CHOH.CH_2ONa + C_2H_5.OH$ entsteht durch Vereinigung von Glycerin mit Natriumalkoholat. Mit Barium, Strontium, Calcium, Blei, Kupfer bildet das Glycerin ähnliche Glycerate.

Das Glycerin findet eine mannigfache Verwendung. Es dient in der Likör- und Limonadenfabrikation als Süßmittel. Seiner öligen Beschaffenheit und gleichzeitigen Beständigkeit wegen wird es zum Füllen von Gasuhren, Manometern und als Schmiermittel für Maschinen verwendet. Buchdruckerwalzen- und Hektographenmasse bestehen aus einem Gemisch von Glycerin und Leim, dem noch etwas färbende Substanz zugesetzt ist. Auch die Kopiertinten enthalten Glycerin. Man verwendet das Glycerin als Zusatz zur Verhinderung des Eintrocknens feuchter Substanzen, wie Modellierton und Druckfarben. Auch als Schlichte- und Appreturmittel in der Textilindustrie wird es so benutzt. Glycerin wird vielfach zu medizinischen Zwecken verwendet, da es die Haut weich und geschmeidig macht, und da Glycerinlösungen als Gurgelmittel zur Beseitigung von Heiserkeit mit Erfolg benutzt werden. Viele Seifen enthalten Glycerin als Zusatz für kosmetische Zwecke, weil es die ätzende Wirkung der Seife herabmindert. Bei weitem der größte Teil des produzierten Glycerins wird aber auf Nitroglycerin verarbeitet, aus dem wieder Dynamit (Mischung von 75% Nitroglycerin und 25% Kieselguhr) und Sprenggelatine Mischung von 93% Nitroglycerin und 7% Nitrocellulose) hergestellt wird.

Butylglycerin, 1, 2, 3-Butantriol, $CH_3.CHOH.CHOH.CH_2OH$, Sdp.$_{27}$ 127° bis 175°.

1, 2, 3-Pentantriol $CH_3.CH_2.CHOH.CHOH.CH_2OH$, Sdp.$_{63}$ 192°, d^{34}_0 1,085.

2, 3, 4-Pentantriol $CH_3.CHOH.CHOH.CHOH.CH_3$, Sdp.$_{27}$ 180°, d° 1,135.

1, 4, 5-Hexantriol $CH_3.CHOH.CHOH.CH_2.CH_2.CH_2OH$, Sdp.$_{10}$ 181°, d° 1,101.

Halogenhydrine des Glycerins:

α-Monochlorhydrin $CH_2OH.CHOH.CH_2Cl$ entsteht durch Behandlung des Glycerins mit Salzsäuregas bei 100°, und aus Epichlorhydrin $CH_2.CH_2.CH_2Cl$ (mit O-Brücke $\diagdown O \diagup$) durch Addition von Wasser. Sdp.$_{18}$ 139°, d° 1,338.

β-Monochlorhydrin $CH_2OH.CHCl.CH_2OH$ bildet sich in kleiner Menge neben dem α-Monochlorhydrin. Sdp.$_{18}$ 146, d° 1,328.

α-Dichlorhydrin $CH_2Cl.CHOH.CH_2Cl$, bildet sich aus Glycerin und überschüssiger Salzsäure beim Erhitzen. Sdp. 176 bis 177°, d^{16} 1,396. Durch Kalilauge geht die Verbindung in Epichlorhydrin $CH_2-CH_2-CH_2Cl$ (mit O-Brücke $\diagdown O \diagup$) über, welches den inneren Aether des α-Monochlorhydrins vorstellt (vgl. den Artikel „Aether").

β-Dichlorhydrin $CH_2Cl.CH_2Cl.CH_2OH$ wird erhalten aus Allylalkohol und Chlor. Sdp. 183°, d° 1,38.

α-Monobromhydrin $CH_2OH.CH_2OH.CH_2Br$, Sdp.$_{12}$ 180°.

α-Dibromhydrin $CH_2Br.CHOH.CH_2Br$, Sdp. 219°, d^{18} 2,11.

β-Dibromhydrin $CH_2Br.CHBr.CH_2OH$, Sdp. 213°.

e) Vierwertige Alkohole. Erythrite. Die vier- und höherwertigen Alkohole sind meistens Naturprodukte oder entstehen durch Reduktion von Zuckerarten. Sie enthalten mehrere asymmetrische Kohlenstoffatome (z. B. $CH_2OH.\overset{*}{C}HOH.\overset{*}{C}HOH.CH_2OH$), und die Anzahl der Isomere nist daher ungeheuer groß. Diese Alkohole weisen durchweg die Eigenschaft der Zucker auf, insofern sie süß schmecken, gut kristallisieren, in Wasser sich leicht lösen, in Aether aber unlöslich sind und sich beim Erhitzen meistens zersetzen. In ihrem chemischen Verhalten zeigen sich gegenüber den Zuckern aber erhebliche Unterschiede. So werden sie durch Hefepilze nicht vergoren und Fehlingsche Lösung wird von ihnen nicht reduziert.

Erythrit, Erythroglucin, Erythromannit, Phycit, 1,2,3,4-Butantetrol,

$$CH_2OH.\overset{*}{C}HOH.\overset{*}{C}HOH.CH_2OH$$

existiert entsprechend den Weinsäuren in 4 Modifikationen. 1. i-Erythrit kommt in freier Form in der Alge Protococcus vulgaris vor, in Form des Erythrins in vielen Flechten und Algen. Erythrin ist Orsellinsäureerythritester und wird durch Kalkwasser leicht in seine Komponenten gespalten.

$$[C_6H_2(OH)_2CH_3.COO]_2C_4H_6(OH)_2 + 2H_2O =$$

$$2\,CH_3-C_6H_2(OH)_2-COOH + 2C_4H_{10}O_4$$

Orsellinsäure   Erythrit

i-Erythrit bildet große tetragonale Prismen, schmeckt süß, ist in Wasser leicht, in Alkohol wenig und in Aether gar nicht löslich. Fp. 126°, Sdp. 330°, d° 1,450. Er ist optisch inaktiv und gärt nicht mit Hefe. Durch schwache Oxydationsmittel geht der Erythrit in Erythrose über, eine Verbindung, welche wahrscheinlich wie die Glycerose ein Gemisch eines Oxyaldehydes $CH_2OH.CHOH.CHOH.CHO$ und eines Oxyketones $CH_2OH.CHOH.CO.CH_2OH$ vor-

stellt. Durch stärkere Oxydationsmittel bildet sich Erythritsäure (Trioxybuttersäure) $CH_2OH.CHOH.CHOH.COOH$ und Mesoweinsäure (Antiweinsäure) $COOH.CHOH.CHOH.COOH$. Trägt man Erythrit in ein Gemisch von konzentrierter Schwefelsäure und Salpetersäure ein, so erhält man Nitroerythrit $C_4H_6(ONO_2)_4$, welcher ähnliche Eigenschaften wie Nitroglycerin zeigt. Mit Benzaldehyd, Formaldehyd oder Aceton bilden sich bei Gegenwart von Salzsäure leicht acetalähnliche Verbindungen, z. B. $C_4H_6O_4(CH.C_6H_5)_2$, welche gut kristallisieren und daher zur Isolierung wohl verwendet werden können. Durch Erhitzen mit konzentrierter Salzsäure entsteht i-Erythritdichlorhydrin $C_4H_6(OH)_2Cl_2$.

d-Erythrit, entsteht durch Reduktion von Erythrulose, welches wiederum aus i-Erythrit durch Sorbosebakterium erhalten wird. Fp. 88°, $[\alpha]_D = -4{,}4°$.

l-Erythrit, bildet sich bei der Reduktion von l-Threose. $[\alpha]_D = +4{,}3°$.

[d + l]-Erythrit ist aus der Vereinigung beider vorigen Verbindungen erhalten; ferner auch aus Divinyl $CH_2 = CH - CH = CH_2$. Fp. 72°.

Pentaerythrit

$$\begin{matrix} CH_2(OH) \\ CH_2(OH) \end{matrix} > C < \begin{matrix} CH_2(OH) \\ CH_2(OH) \end{matrix}$$

entsteht bei der Einwirkung von Kalk auf die wässerige Lösung von Formaldehyd und Acetaldehyd. Fp. 250° bis 255°.

f) Fünfwertige Alkohole. Pentite. Die fünfwertigen Alkohole sind fast alle durch Reduktion der entsprechenden Zuckerarten (Pentosen) erhalten worden. Ihre Konstitution ergibt sich daher aus der Konstitution dieser Pentosen. Die einfachen Pentite $CH_2OH.\overset{*}{C}HOH.CHOH.\overset{*}{C}HOH.CH_2OH$ haben zwei asymmetrische Kohlenstoffatome. Da dieselben noch durch ein Kohlenstoffatom getrennt sind, ergeben sich daraus fünf Modifikationen: zwei optische aktive, eine inaktive spaltbare (d + l), und zwei inaktive nicht spaltbare, die durch Kompensation zweier im entgegengesetzten Sinne wirkender Molekülkomplexe innerhalb eines Moleküls entstehen.

l-Arabit $C_5H_7(OH)_5$ entsteht durch Reduktion von l-Arabinose, schmeckt süß und dreht in wässeriger Lösung auf Zusatz von Borax nach links. Fp. 102°.

d-Arabit wird erhalten durch Reduktion von d-Arabinose und dreht rechts.

[d + l]-Arabit läßt sich durch Vereinigung der beiden vorigen Substanzen herstellen. Fp. 106°.

Xylit $C_5H_7(OH)_5$ entsteht durch Reduktion von Xylose (Holzzucker); sirupartige Flüssigkeit, optisch inaktiv.

Adonit $C_5H_7(OH)_5$ kommt in der Natur vor in Adonis versalis und läßt sich auch durch Reduktion von Ribose erhalten. Fp 102°, optisch inaktiv.

Rhamnit $CH_3.C_5H_6(OH)_5$ wird hergestellt aus Rhamnose durch Reduktion. Fp 121°, dreht rechts, $[\alpha]_D^{20} + 10{,}7°$.

Raumformeln der Pentite (unter dem Strich ist die dem Alkohol zugehörige Aldopentose, Pentonsäure und Trioxyglutarsäure angeführt):

1	2	3
CH_2OH	CH_2OH	CH_2OH
$H.C.OH$	$HO.C.H$	$H.C.OH$
$HO.C.H$	$H.C.OH$	$HO.C.H$
$HO.C.H$	$H.C.OH$	$H.C.OH$
CH_2OH	CH_2OH	CH_2OH
l-Arabit	d-Arabit	Xylit
l-Arabinose	d-Arabinose u. d Lyxose	d- u. l-Xylose
l-Arabonsäure	d-Arabonsäure	l-Xylonsäure
l-Trioxyglutarsäure	d-Lyxonsäure u. d-Trioxyglutarsäure	Xylotrioxyglutarsäure

4	5
CH_2OH	
$H.C.OH$	
$H.C.OH$	(d + l)-Arabit
$H.C.OH$	
CH_2OH	
Adonit	
l-Ribose	
l-Ribonsäure	
Ribotrioxyglutarsäure	

g) Sechswertige Alkohole Hexite. Die sechswertigen Alkohole stehen in ihren Eigenschaften in nächster Beziehung zu der wichtigsten Gruppe der Zuckerarten, zu den „Hexosen" $C_6H_{12}O_6$. Sie unterscheiden sich wesentlich nur darin von ihnen, daß sie Fehlingsche Lösung nicht reduzieren und durch Hefe nicht vergoren werden. Die Hexite finden sich zum Teil als Naturprodukte, die meisten werden jedoch durch Reduktion der entsprechenden Glucosen gewonnen. Durch schwache Oxydationsmittel lassen sie sich wieder in die Zucker überführen. Für ihre Charakteristik wichtig sind ebenso wie bei anderen mehrwertigen Alkoholen (s. Erythrit) acetalartige gut kristallisierende Verbindungen mit Benzaldehyd, Formaldehyd oder Aceton. Die einfachsten sechswertigen Alkohole ent-

halten vier asymmetrische Kohlenstoffatome: $CH_2OH . \overset{*}{C}HOH . \overset{*}{C}HOH . \overset{*}{C}HOH . \overset{*}{C}HOH . CH_2OH$. Danach sind für sie 14 Modifikationen möglich: 8 optisch aktive, 4 spaltbare inaktive und 2 nicht spaltbare durch intramolekulare Kompensation entstandene inaktive Hexite.

d-Mannit, gewöhnlicher Mannit, $CH_2OH.(CHOH)_4CH_2OH$, kommt in vielen Pflanzen vor, besonders in der Manna-Esche (Fraxinus ornus), deren eingetrockneter Saft „Manna" heißt und 40 bis 60 % Mannit enthält. Durch Ausziehen mit heißem Wasser oder Alkohol läßt er sich daraus leicht gewinnen. Der Mannit findet sich auch in manchen Pilzen und Schwämmen, so im Agaricus integer (Speitäubling), ferner in den Blättern der Syringa vulgaris, in den Kirschlorbeerfrüchten, im Sellerie und auch im Brot. Er bildet sich in nicht unbeträchtlichen Mengen bei der Milchsäure- und namentlich bei der Schleimsäuregärung des Rohrzuckers, und bei der Reduktion der d-Mannose mit Natriumamalgam. Auch der Fruchtzucker (d-Fructose) ergibt bei der Reduktion d-Mannit neben d-Sorbit.

Mannit kristallisiert aus Wasser in dicken rhombischen Prismen, aus Alkohol in feinen seideglänzenden Nadeln, welche in Wasser leicht, in Aether gar nicht löslich sind und süß schmecken. Fp. 166°, zersetzt sich bei der Destillation. Die wässerige Lösung lenkt den polarisierten Lichtstrahl fast gar nicht ab. Durch Zusatz von Borax wird sie aber stark rechtsdrehend. Durch schwache Oxydationsmittel entsteht aus dem Mannit Fruchtzucker $CH_2OH.(CHOH)_3.CO.CH_2OH$ und d-Mannose $CH_2OH.(CHOH)_5.CHO$, durch stärkere Oxydationsmittel d-Mannonsäure (oder deren Lakton) $CH_2OH.(CHOH)_4.COOH$ und d-Mannozuckersäure $COOH.(CHOH)_4.COOH$; daneben bildet sich auch unter Sprengung der Kohlenstoffkette Erythritsäure, Weinsäure, Oxalsäure u. a. Beim Behandeln mit Chlorwasserstoff oder Bromwasserstoff entstehen Dichlorhydrin $C_6H_8Cl_2(OH)_4$ und Dibromhydrin $C_6H_8Br_2(OH)_4$. Jodwasserstoff reduziert den Mannit zu 2- und 3-Hexyljodid. Löst man Mannit in einem Gemenge konzentrierter Schwefel- und Salpetersäure auf, so bildet sich Nitromannit $C_6H_8(ONO_2)_6$, welcher in feinen Nadeln kristallisiert und sehr explosiv ist.

l-Mannit entsteht durch Reduktion von l-Mannose. Fp. 163° bis 164°, durch Borax-Zusatz stark linksdrehend.

[l + d]-Mannit bildet sich bei der Reduktion von inaktiver Mannose. Fp. 168°. Die wässerige Lösung ist auch bei Gegenwart von Borax inaktiv. Der [d +] l-Mannit ist identisch mit dem sogenannten α-Akrit. Letzterer ist das Reduktionsprodukt von künstlicher i-Fruktose. Diese künstliche i-Fruktose wird hergestellt durch Polymerisation des Formaldehyds mittels schwacher Alkalien, oder durch Einwirkung von Brom auf Acroleïn und Zersetzung des entstandenen Acroleïndibromids mit Barytwasser (vgl. den Artikel „Aldehyde"). Mittels dieser Synthesen ist es gelungen, [l + d]-Mannit und seine Derivate (l-Mannit, d-Mannit, Mannonsäuren, Mannozuckersäuren) künstlich aufzubauen (Emil Fischer 1887).

d-Sorbit $CH_2OH.(CHOH)_4.CH_2OH$ findet sich im Saft der Vogelbeeren (Sorbus aucuparia), außerdem im Saft vieler Früchte (Pflaumen, Aepfel, Birnen, Kirschen usw). Er entsteht durch Reduktion von Traubenzucker (d-Glucose) sowie von Fruchtzucker (d-Fructose) neben d-Mannit. Fp. 104° bis 109°, kristallisiert aus Wasser in feinen Nädelchen, die 1 Mol Kristallwasser enthalten und dann bei 75° schmelzen. Der Sorbit ist in wässeriger Lösung linksdrehend. Durch Reduktion mit Jodwasserstoff wird normales sekundäres Hexyljodid $CH_3(CH_2)_3.CHJ.CH_3$ erhalten. $[\alpha]_D = -1{,}73°$, auf Zusatz von Borax dreht er rechts.

l-Sorbit entsteht durch Reduktion von l-Gulose. Fp. 75°.

Dulcit, Melampyrin $CH_2OH.(CHOH)_4.CH_2OH$, findet sich in der Dulcitmanna (Madagaskar) und in vielen Pflanzen. Er entsteht durch Reduktion von d-Galactose und von Milchzucker. Der Dulcit kristallisiert in großen monoklinen Säulen, welche in Wasser ziemlich schwer, in Alkohol sehr wenig, in Aether gar nicht löslich sind und süß schmecken. Fp. 188°. Die wässerige Lösung ist inaktiv, auch auf Zusatz von Borax. Der Alkohol ist eine nicht spaltbare durch intramolekulare Kompensation entstandene Modifikation der einfachen Hexite. Jodwasserstoff erzeugt 2- und 3-Hexyljodid. Durch Oxydation mit Salpetersäure entsteht Schleimsäure $COOH.(CHOH)_4.COOH$.

d-Talit $CH_2OH.(CHOH)_4.CH_2OH$, entsteht durch Reduktion von d-Talose. Fp. 86°.

[d + l]-Talit, durch Oxydation des Dulcits mit Bleisuperoxyd und Salzsäure und nachfolgender Reduktion des Oxydationsproduktes erhalten, Fp. 66°.

d-Idit und l-Idit $CH_2OH.(CHOH)_4.CH_2OH$, farblose sirupartige Flüssigkeiten, die durch Reduktion von d- bezw. l-Idose gewonnen wurden.

Rhamnohexit $CH_3.(CHOH)_5.CH_2OH$, ein Hexit der Heptanreihe, entsteht durch Reduktion von Rhamnohexose $CH_3.(CHOH)_5.CHO$. Fp. 173°. Die wässerige Lösung ist rechtsdrehend $[\alpha]_D^{20} = +14°$.

Raumformeln der Hexite (unter dem Strich ist die zu dem Alkohol gehörige Aldo-

hexose, Hexonsäure und Zuckersäure angeführt).

1	2
CH_2OH	CH_2OH
H.C.OH	HO.C.H
H.C.OH	HO.C.H
HO.C.H	H.C.OH
HO.C.H	H.C.OH
CH_2OH	CH_2OH
l-Mannit	d-Mannit
l-Mannose l-Mannonsäure l-Mannozuckersäure	d-Mannose d-Mannonsäure d-Mannozuckersäure

3	4
CH_2OH	CH_2OH
HO.C.H	H.C.OH
H.C.OH	HO.C.H
HO.C.H	H.C.OH
HO.C.H	H.C.OH
CH_2OH	CH_2OH
l-Sorbit	d-Sorbit
l-Glucose, l-Gulose l-Gluconsäure l-Gulonsäure l-Zuckersäure	d-Glucose, d-Gulose d-Gluconsäure d-Gulonsäure d-Zuckersäure

5	6	7
CH_2OH	CH_2OH	CH_2OH
H.C.OH	HO.C.H	H.C.OH
HO.C.H	H.C.OH	HO.C.H
HO.C.H	HO.C.H	H.C.OH
H.C.OH	H.C.OH	HO.C.H
CH_2OH	CH_2OH	CH_2OH
Dulcit	l-Idit	d-Idit
d-u. l-Galactose d-u. l-Galactonsäure Schleimsäure	l-Idose l-Idonsäure l-Idozuckersäure	d-Idose d-Idonsäure d-Idozuckersäure

Die Fortsetzung der Formeln steht oben auf der nächsten Spalte.

Die noch übrigen 4 Modifikationen sind Racemkörper, hervorgegangen aus Vereinigung entsprechender d- und l-Modifikationen, also 11. [d + l]-Mannit, 12. [d + l]-Sorbit, 13. [d + l]-Idit, 14. [d + l]-Talit.

8	9	10
CH_2OH	CH_2OH	CH_2OH
HO.C.H	H.C—OH	HO.C.H
HO.C.H	H.C—OH	HO.C.H
HO.C.H	H.C—OH	HO.C.H
H.C.OH	HO.C—H	HO.C.H
CH_2OH	CH_2OH	CH_2OH
d-Talit	l-Talit	ein noch unbekannter inaktiver Hexit
d-Talose d-Talonsäure d-Taloschleimsäure	— — l-Taloschleimsäure	

h) Sieben- und mehrwertige Alkohole. Perseit, d-Mannoheptit $CH_2OH.(CHOH)_5.CH_2OH$, findet sich in den Früchten und Blättern von Laurus persea. Künstlich ist er aus d-Mannose hergestellt worden, indem diese erst durch Anlagerung von Blausäure in Mannose-Cyanhydrin, dann durch Verseifung in Mannosecarbonsäure und schließlich durch Reduktion über die Mannoheptose in d-Mannoheptit übergeführt wurde:

$$\underset{\text{Mannose}}{\begin{array}{c} CHO \\ | \\ (CHOH)_4 \\ | \\ CH_2OH \end{array}} \longrightarrow \underset{\text{Mannose-Cyanhydrin}}{\begin{array}{c} CN \\ | \\ CHOH \\ | \\ (CHOH)_4 \\ | \\ CH_2OH \end{array}}$$

$$\longrightarrow \underset{\text{Mannose-Carbonsäure}}{\begin{array}{c} COOH \\ | \\ (CHOH)_5 \\ | \\ CH_2OH \end{array}} \longrightarrow \underset{\text{Mannoheptit}}{\begin{array}{c} CH_2OH \\ | \\ (CHOH)_5 \\ | \\ CH_2OH \end{array}}$$

Der Perseit bildet kleine Nädelchen, ist in Wasser leicht, in Alkohol wenig löslich, und dreht in wässeriger Lösung auf Zusatz von Borax stark rechts. Fp 187°. Durch Reduktion mit Jodwasserstoff entsteht Hexahydrotoluol $CH_3.CH\langle{}^{CH_2-CH_2}_{CH_2-CH_2}\rangle CH_2$.

l-Mannoheptit, entsteht durch Reduktion von l-Mannoheptose. Fp. 187°.

[d + l]-Mannoheptit, entsteht durch Vereinigung der beiden vorigen Substanzen. Fp. 203°.

Volemit $CH_2OH(CHOH)_5CH_2OH$, findet sich im Lactarius volemus (Hutpilz). Fp. 155°, rechtsdrehend.

α-Glucoheptit $C_7H_9(OH)_7$, Fp. 128°, inaktiv und

α-Galaheptit $C_7H_9(OH)_7$, Fp. 183°,

wurde aus d-Glucose und d-Galactose nach demselben Verfahren wie der Perseit aus der d-Mannose hergestellt (s. o.) In gleicher Weise wurden aus Heptosen und Octosen erhalten:

d-Mannooctit $CH_2OH(CHOH)_6CH_2OH$, Fp. 258°.

α-Glucooctit $CH_2OH(CHOH)_6CH_2OH$, Fp. 141°.

α-Glucononit $CH_2OH(CHOH)_7CH_2OH$, Fp. 194°. —

2B. Aromatische Alkohole. a) Einkernige einwertige Alkohole. Die aromatischen Alkohole entstehen nach denselben allgemeinen Bildungsweisen, wie die aliphatischen Alkohole. Eine besonders bequeme Darstellungsmethode ist die Einwirkung von Alkali auf die Aldehyde, welche in der aromatischen Reihe meistens leichter zugänglich sind als die Alkohole

$$\underset{\text{Benzaldehyd}}{2C_6H_5.CHO} + KOH = \underset{\text{Benzoesaures Kalium}}{C_6H_5.COOK} + \underset{\text{Benzylalkohol}}{C_6H_5.CH_2OH}$$

Auch das chemische Verhalten der aromatischen Alkohole ist dem der aliphatischen vollkommen analog.

Benzylalkohol, Phenylcarbinol, $C_6H_5.CH_2OH$ (isomer mit Kresol und Anisol) findet sich im Peru- und Tolubalsam und im Storax als Benzoesäure- und Zimmtsäurebenzylester, außerdem in Form anderer Ester, z. T. auch frei noch in manchen ätherischen Oelen. Aus den Estern gewinnt man den Alkohol leicht durch Verseifen mit Kalilauge. Zu seiner Darstellung benutzt man meistens die Zerlegung des Benzaldehyds in Benzoesäure und Benzylalkohol durch Schütteln mit starker Kalilauge (s. o.).

Der Benzylalkohol ist eine farblose, schwach aromatisch riechende Flüssigkeit, die sich in Wasser schwer, in Alkohol und Aether leicht löst. Sdp. 206°, d^0 1,0628, d^{15} 1,050. Durch Oxydation entsteht aus dem Benzylalkohol Benzoesäure $C_6H_5.COOH$, durch Reduktion mit Jodwasserstoff Toluol $C_6H_5.CH_3$, durch Behandeln mit Salzsäure oder Bromwasserstoffsäure in der Hitze entsteht Benzylchlorid $C_6H_5.CH_2Cl$ und Benzylbromid $C_6H_5.CH_2Br$.

p-Chlorbenzylalkohol $Cl.C_6H_4.CH_2OH$ kristallisiert aus heißem Wasser in langen Spießen, Fp. 70,5°.

p-Brombenzylalkohol $Br.C_6H_4.CH_2OH$, Fp. 77°.

p-Jodbenzylalkohol $J.C_6H_4.CH_2OH$, Fp. 72°.

o-Nitrobenzylalkohol $NO_2.C_6H_4.CH_2OH$ lange Nadeln, Fp. 74°.

m-Nitrobenzylalkohol $NO_2.C_6H_4.CH_2OH$, Fp. 27°.

p-Nitrobenzylalkohol $NO_2.C_6H_4.CH_2OH$, Fp. 93°.

o-Aminobenzylalkohol $NH_2.C_6H_4.CH_2OH$ entsteht durch Reduktion von o-Nitrobenzylalkohol, Fp. 82°, $Sdp._{10}$ 166°, $Sdp._{760}$ 280° unter geringer Zersetzung. Infolge der Orthostellung der beiden Substituenten am Benzolkern neigt der Alkohol zu Ringschlüssen. So gibt er mit Schwefelkohlenstoff Thiocumazon $C_6H_4\begin{cases} CH_2 - O \\ NH - CS \end{cases}$ usw.

p-Aminobenzylalkohol $NH_2.C_6H_4.CH_2O$, Fp. 95°.

o-Tolylcarbinol, Tolubenzylalkohol $\overset{2}{C}H_3.C_6H_4.\overset{1}{C}H_2OH$, Fp. 34°, Sdp. 225°, d^{40} 1,023.

m-Tolylcarbinol, $\overset{3}{C}H_3.C_6H_4.\overset{1}{C}H_2OH$, flüssig, Sdp. 217°, d^0 1,036.

p-Tolylcarbinol, $\overset{4}{C}H_3.C_6H_4.CH_2OH$, Fp. 59°, Sdp. 217°.

2, 4-Dimethylbenzylalkohol, $(\overset{2,4}{C}H_3)_2.C_6H_3.\overset{1}{C}H_2OH$, Fp. 22°, Sdp. 232°.

2, 5-Dimethylbenzylalkohol, Mesitylalkohol, $(\overset{3,5}{C}H_3)_2.C_6H_3.\overset{1}{C}H_2OH$, flüssig, Sdp. 220°.

2, 4, 5-Trimethylbenzylalkohol, Cumobenzylalkohol, $(\overset{2,4,5}{C}H_3)_3.C_6H_2.\overset{1}{C}H_2OH$, Fp. 168°.

3, 4, 5-Trimethylbenzylalkohol, Hemimellibenzylalkohol, $(\overset{3,4,5}{C}H_3)_3.C_6H_2.\overset{1}{C}H_2OH$, Fp. 78°.

4-Isopropylbenzylalkohol, Cuminalkohol, $(CH_3)_2\overset{4}{C}H.C_6H_4.\overset{1}{C}H_2OH$, flüssig, Sdp. 246°, d^{10} 0,9775.

Pentamethylbenzylalkohol, Mellithalkohol, $(CH_3)_5.C_6.CH_2OH$, Fp. 160,5°.

Benzylcarbinol, β-Phenyläthylalkohol, $C_6H_5.CH_2.CH_2OH$, flüssig, kommt in ätherischem Oel der Rosenblätter vor und besitzt schwachen aromatischen Geruch, Sdp 219°, d^{21} 1,034.

Phenylmethylcarbinol, α-Phenyläthylalkohol, $C_6H_5.CHOH.CH_3$, entsteht durch Reduktion von Acetophenon $C_6H_5.CO.CH_3$. Sdp. 203°, d 1,013.

Hydrozimmtalkohol, Phenylpropylalkohol, $C_6H_5.CH_2.CH_2.CH_2OH$, bildet sich bei der Reduktion von Styron $C_6H_5.CH = CH.CH_2OH$. Dickflüssig, Sdp. 235°, d^{18} 1,008.

Benzylmethylcarbinol, Phenylisopropylalkohol, $C_6H_5.CH_2.CHOH.CH_3$, flüssig, Sdp. 215°.

Phenyläthylcarbinol $C_6H_5.CHOH.CH_2.CH_3$ flüssig, Sdp. 221°, d^0 1,016.

Phenyldimethylcarbinol $C_6H_5.COH.(CH_3)_2$ flüssig, Sdp_{10} 94°.

Benzyldimethylcarbinol, $C_6H_5.CH_2.COH.(CH_3)_2$, Fp. 21°, Sdp. 225°.

Zimmtalkohol. Styron, $C_6H_5.CH=CH.CH_2OH$, findet sich im flüssigen Storax als Zimmtsäureester. Lange Nadeln von hyacinthenähnlichem Geruch, Fp. 33°, Sdp. 254 bis 255, d_4^{20} 1,0440, $d_4^{77,3^\circ}$ 1,0003, Brechungsvermögen n_α = 1,57 510, molekulares Brechungsvermögen 72,64 (berechnet 60,8). Das Styron ist in Wasser ziemlich löslich, sehr leicht in Alkohol und Aether. Schwache Oxydationsmittel (Platinmohr) führen den Zimmtalkohol über in Zimmtaldehyd $C_6H_5.CH=CH.CHO$, stärkere Oxydationsmittel lassen Zimmtsäure, Benzaldehyd und Benzoesäure entstehen. Durch Reduktion mit Jodwasserstoff wird Toluol und Allylbenzol $C_6H_5.CH.CH=CH_2$ gebildet.

b) Phenolalkohole. Die Phenolalkohole enthalten eine oder mehrere Hydroxylgruppen im Benzolkern und haben daher gleichzeitig Phenol- und Alkoholeigenschaften Sie entstehen nach den allgemeinen Bildungsweisen. Eine besondere Synthese bietet die Einwirkung von Formaldehyd auf Phenole bei Gegenwart alkalischer Kondensationsmittel (verdünnte Natronlauge). Es bilden sich dabei Phenolalkohole, deren CH_2OH-Gruppe in Ortho- oder Parastellung zur Hydroxylgruppe des Phenols steht

$$C_6H_5.OH + H.CHO = C_6H_4\langle{}^{OH}_{CH_2OH}$$

o-Oxybenzylalkohol, Salicylalkohol, Saligenin, $\overset{1}{O}H.C_6H_4.\overset{2}{C}H_2OH$, findet sich als Glycosid im Salicin, $C_6H_{11}O_5.O.C_6H_4.CH_2OH$, welches in den Rinden und Blättern der Weiden (Salix helix) enthalten ist. Durch Kochen mit verdünnten Säuren oder durch die Einwirkung der Enzyme Emulsin oder Ptyalin wird das Salicin in Traubenzucker und Saligenin gespalten

$$C_6H_{11}O_5.O.C_6H_4.CH_2OH + H_2O = C_6H_{12}O_6 + HO.C_6H_4.CH_2OH$$

Synthetisch kann man das Saligenin erhalten durch längeres Erhitzen von Phenol mit Methylenchlorid und starker Natronlauge auf 100°

$$C_6H_5.OH + CH_2Cl_2 + 2NaOH = OH.C_6H_4.CH_2OH + 2NaCl + H_2O.$$

Neben p-Oxybenzylalkohol entsteht das Saligenin bei der Einwirkung von Formaldehydlösung (etwa 40 %) auf Phenol mittels verdünnter Natronlauge bei Zimmertemperatur.

Das Saligenin bildet farblose Kristalle, Fp. 86°, welche bei höherer Temperatur sublimieren, d^{25} 1,1613. Es löst sich in 15 Teilen Wasser von 22°, fast in jedem Verhältnis in siedendem. Von Alkohol und Aether wird es leicht gelöst. Die wässerige Lösung wird durch Eisenchlorid tiefblau gefärbt, während die Lösung in konzentrierter Schwefelsäure rot aussieht. Durch Oxydationsmittel geht das Saligenin in Salicylaldehyd $OH.C_6H_4.CHO$ und Salicylsäure $HO.C_6H_4.COOH$ über. Durch längeres Erhitzen mit Mineralsäuren oder wasserentziehenden Mitteln entsteht Saliretin $OH.C_6H_4.CH_2.O.C_6H_4.CH_2OH$ ein gelblicher harzartiger Körper, der in Alkohol und Alkalien löslich ist.

m-Oxybenzylalkohol $\overset{3}{O}H.C_6H_4.\overset{1}{C}H_2OH$, entsteht bei der Reduktion von m-Oxybenzoesäure. Fp. 67°.

p-Oxybenzylalkohol $\overset{4}{O}H.C_6H_4.\overset{1}{C}H_2OH$, feine weiße Nadeln, Fp. 110°.

Anisalkohol $CH_3.\overset{4}{O}.C_6H_4.\overset{1}{C}H_2OH$ der Methyläther des p-Oxybenzylalkohols, bildet sich neben Anissäure $CH_3.O.C_6H_4.COOH$ bei der Einwirkung von Kali auf Anisaldehyd $CH_3.OC_6H_4.CHO$. Weiße glänzende Nadeln, Fp. 45°, Sdp. 259°, d^{26} 1,1083.

γ-Homosaligenin $\overset{5}{C}H_3.C_6H_3(\overset{2}{O}H)\overset{1}{C}H_2OH$, Fp. 105°, gibt mit Eisenchlorid tiefblaue Färbung.

Vanillylalkohol

CH₃O / OH—⟨benzene ring⟩—CH₂OH

entsteht durch Reduktion von Vanillin $CH_3O.C_6H_3.(OH)CHO$. Fp. 115°.

Piperonylalkohol

$CH_2\langle{}^{O}_{O}\rangle$—⟨benzene ring⟩—$CH_2OH$,

durch Reduktion von Piperonal $CH_2O_2 : C_6H_3.CHO$ erhalten, Fp. 61°.

Coniferylalkohol

HO—⟨benzene ring⟩—$CH=CH.CH_2OH$, with OCH_3 on the ring

kommt als Glucosid vor im Coniferin $C_6H_{11}O_5.O.C_6H_3(OCH_3).C_3H_4OH$, welches sich im Cambialsaft der Coniferen und in den Spargelpflanzen findet. Durch verdünnte Säuren oder durch Emulsin läßt sich das Coniferin in Glucose und Coniferylalkohol spalten. Der Alkohol bildet weiße, geruchlose Kristalle. Fp. 74°. Durch Einwirkung von Mineralsäuren geht er leicht in einen harzartigen Körper Coniferetin über. In konzentrierter Schwefelsäure löst er sich mit roter Farbe. Bei der Oxydation

liefert der Coniferylalkohol Vanillin $\overset{3}{CH_3O}(\overset{4}{HO})$ $.\overset{1}{C_6H_3}.CHO$, bei der Reduktion Eugenol $\overset{3}{CH_3O}(\overset{4}{HO}).\overset{1}{C_6H_3}.CH_2.CH=CH_2$.

C u b e b i n

$$CH_2\left<\begin{matrix}O\\O\end{matrix}\right>C_6H_3 \cdot CH=CH.CH_2OH$$

findet sich in den Cubeben (Cubebenpfeffer). Kleine Nadeln, Fp 125°, welche in Wasser kaum löslich und für sich allein geschmacklos sind, aber in alkoholischer Lösung bitter schmecken. Der Alkohol ist optisch aktiv (linksdrehend) und gibt mit Schwefelsäure eine purpurviolette Färbung. Bei der Oxydation entsteht Piperonylsäure.

S y r i n g e n i n, Methoxyconiferylalkohol

$$HO \cdot C_6H_2(OCH_3)_2 \cdot CH=CH.CH_2OH,$$

findet sich als Glycosid Syringin $C_6H_{11}O_5.O.C_6H_2(OCH_3)_2C_3H_4OH + H_2O$ in der Rinde von Syringa vulgaris und Ligustrum vulgare L. Durch Spaltung mittels verdünnter Säuren oder durch Emulsin erhält man aus dem Glycosid Traubenzucker und Syringenin. Hellrosenrote amorphe Masse.

c) M e h r k e r n i g e e i n w e r t i g e A l k o h o l e. Benzhydrol, Diphenylcarbinol, $C_6H_5.CH(OH).C_6H_5$, entsteht durch Reduktion von Benzophenon $C_6H_5.CO.C_6H_5$ mit Natriumamalgam oder mit alkoholischem Kali bei 160°. Den Essigester des Benzhydrols $(C_6H_5)_2.CH.OOC.CH_3$, der sich leicht wieder verseifen läßt, erhält man durch Umsetzen des Diphenylbrommethans $(C_6H_5)_2.CHBr$ mit Natriumacetat. Feine seideglänzende Nadeln, Fp. 68°, Sdp. 298° unter teilweiser Zersetzung, indem sich Wasser und Benzhydroläther $(C_6H_5)_2CH.O.CH(C_6H_5)_2$ bildet. Der Alkohol ist in Wasser schwer löslich, leicht löslich dagegen in Alkohol, Aether, Chloroform, Schwefelkohlenstoff und Eisessig. Bei der Oxydation entsteht leicht Benzophenon, bei der Reduktion erhält man Benzpinakon

$$\begin{matrix}C_6H_5\\C_6H_5\end{matrix} C(OH)-C(OH) \begin{matrix}C_6H_5\\C_6H_5\end{matrix}$$

D i m e t h y l a m i d o b e n z h y d r o l $(CH_3)_2\overset{4}{N}.C_6H_4-\overset{1}{C}H(OH)-C_6H_5$ wird durch Kondensation von Benzaldehyd mit Dimethylanilin mittels konzentrierter Salzsäure erhalten

$$C_6H_5.C\overset{O}{\underset{H}{\diagup}} + C_6H_5.N(CH_3)_2 =$$

$$C_6H_5\overset{OH}{\underset{H}{C}}C_6H_4.N(CH_3)_2.$$

Feine Nadeln, Fp. 69° bis 70°. Beim Erwärmen mit Dimethylanilin und Chlorzink liefert es Leukomalachitgrün (Tetramethyldiamidotriphenylmethan)

$$C_6H_5CH\begin{matrix}C_6H_4N(CH_3)_2\\C_6H_4N(CH_3)_2\end{matrix}$$

T e t r a m e t h y l d i a m i d o b e n z h y d r o l $(CH_3)_2N.C_6H_4.CHOH.C_6H_4.N(CH_3)_2$ entsteht durch Reduktion aus dem entsprechend substituierten Benzophenon (dem sogenannten Michlerschen Keton). Trikline Prismen, Fp. 96°, welche in Alkohol und Aether leicht löslich sind.

D i t o l y l c a r b i n o l $CH_3.C_6H_4.CH(OH).C_6H_4.CH_3$, Fp. 66°, Sdp. etwa 360°.

T r i p h e n y l c a r b i n o l $(C_6H_5)_3.COH$, entsteht bei der Oxydation von Triphenylmethan mit Chromsäure oder beim Erhitzen der Triphenylhalogenmethane mit Wasser. Sehr bequem erhält man das Carbinol bei der Einwirkung von Benzophenon auf Phenylmagnesiumbromid in ätherischer Lösung

$$C_6H_5.Mg.Br + CO\begin{matrix}C_6H_5\\C_6H_5\end{matrix}$$

$$C_6H_5-C\begin{matrix}C_6H_5\\O.MgBr\\C_6H_5\end{matrix} + H_2O$$

$$C_6H_5-C\begin{matrix}C_6H_5\\OH\\C_6H_5\end{matrix} + Mg\begin{matrix}Br\\OH\end{matrix}$$

Statt des Benzophenons läßt sich auch Benzoesäureäthylester verwenden.

Das Triphenylcarbinol bildet farblose Kristalle, Fp. 159°, welche unzersetzt oberhalb 360° destillieren, und in Alkohol, Aether und Benzol leicht löslich sind. Bei der Einwirkung von Phosphorpentachlorid entsteht Triphenylchlormethan.

D i p h e n y l - m - T o l y l c a r b i n o l $(C_6H_5)_2.\overset{1}{C}OH.C_6H_4.\overset{3}{C}H_3$, Fp. 150°. Die substituierten Derivate der Triphenylcarbinols und seiner Homologen bilden die Substanzen, die der großen Klasse der Triphenylmethanfarbstoffe zugrunde liegen. Als Substituenten treten hauptsächlich die NH_2-, $N(CH_3)_2$, NHC_6H_5 und OH-Gruppe auf. Die Carbinole entstehen durch Oxydation der entsprechenden Triphenylmethanderivate. Wenn sie basische Substituenten enthalten, erhält man sie auch aus den wässerigen Farbstofflösungen durch Zufügen von Alkali. Die Carbinole, welche auch als Leukohydrate der Farbstoffe bezeichnet werden, sind meist farblose, in Wasser wenig, in organischen Lösungsmitteln meistens gut lösliche Basen. Durch Zufügen von Säuren entstehen zuerst die farblosen Salze der Carbinole, welche nun aber mehr oder weniger rasch Wasser abspalten und in die Farbstoffe übergehen. Hierbei erfahren

sie noch eine intramolekulare Umlagerung, indem der eine Benzolkern chinoid wird. Als Beispiel sei das Malachitgrün angeführt. Das Leukohydrat, welches aus der Farbstofflösung ausgefällt wird, bildet farblose Würfel, Fp. 132°, welche beim Zufügen von Salzsäure wieder in den Farbstoff übergehen

$$(CH_3)_2N-C_6H_4-C(OH)(C_6H_4.N(CH_3)_2)(C_6H_5) + HCl$$

Malachitgrün-Leukohydrat, Farbbase, Carbinol.

$$Cl(CH_3)_2N=C_6H_4=C(C_6H_4.N(CH_3)_2)(C_6H_5) + H_2O$$

Malachitgrün.

Ganz analog liegen die Verhältnisse bei den anderen Farbstoffen der Triphenylmethanreihe. Als Beispiele seien angeführt:

Pararosanilin, Parafuchsinleukohydrat, 4'-, 4''-, 4''' - Triamidotriphenylcarbinol $C(OH)\equiv(C_6H_4NH_2)_3$, farblose Kristallblättchen, deren salzsaures Salz das intensiv rote Parafuchsin $(NH_2 . C_6H_4)_2=C=C_6H_4=NH_2Cl$, einen Bestandteil des technischen Fuchsins bildet.

Kristallviolettbase, Hexamethylpararosanilin $C(OH)\equiv[C_6H_4.N(CH_3)_2]_3$, rötlich violette monokline Tafeln, deren salzsaures Salz $[(CH_3)_2N.C_6H_4]=C=C_6H_4=N(CH_3)_2Cl$ das Kristallviolett vorstellt.

Rosanilin, Triamidodiphenyltolylcarbinol, Fuchsinleukohydrat $\overset{4}{N}H_2(\overset{3}{C}H_3).C_6H_3\overset{1}{—}C(OH)=(C_6H_4NH_2)_2$, farblose Nadeln. Das salzsaure tiefrote Salz ist das Fuchsin

$$NH_2(CH_3).C_6H_3.C\begin{cases}C_6H_4.NH_2\\C_6H_4=NH_2Cl\end{cases}$$

Triphenylrosanilin

$$\begin{matrix}C_6H_5.NH\\CH_3\end{matrix}\rangle C_6H_3—C(OH)=(C_6H_4.NH.C_6H_5)_2$$

farblos, Fp. 100°. Das salzsaure Salz bildet das Anilinblau (vgl. den Artikel „Farbstoffe").

Phenylbenzylcarbinol, Toluylenhydrat, Stilbenhydrat, $C_6H_5.CH_2.CH(OH).C_6H_5$ entsteht durch Reduktion von Benzoïn $C_6H_5.CO.CH(OH).C_6H_5$ oder Desoxybenzoïn $C_6H_5.CO.CH_2.C_6H_5$. Das Carbinol bildet lange, feine Nadeln, Fp. 62°, und destilliert unzersetzt.

Triphenylvinylalkohol

$$\begin{matrix}C_6H_5\\C_6H_5\end{matrix}\rangle C=C(OH)—C_6H_5,$$

scheint manchmal auch in einer isomeren Form

$$\begin{matrix}C_6H_5\\C_6H_5\end{matrix}\rangle CH—CO.C_6H_5$$

als Phenyldesoxybenzoïn zu reagieren. Weiße Nadeln, Fp. 136°, Sdp. $_{40}$ 270—280°. Die Hydroxylgruppe gibt sich durch die Acetylierbarkeiten und Benzoylierbarkeit der Verbindung zu erkennen. Dagegen läßt Brom in Schwefelkohlenstofflösung ein Triphenylbromäthanon $(C_6H_5)CBr—CO—C_6H_5$ entstehen. Bei der Oxydation wird Phenylbenzoïn $(C_6H_5)_2C(OH)—CO.C_6H_5$ erhalten.

1,3 - Diphenylpropylalkohol $C_6H_5.CH_2.CH_2.CH(OH).C_6H_5$. Oelige Flüssigkeit Sdp. $_{70}$ 240 °.

Dibenzylcarbinol $C_6H_5.CH_2.CH(OH).CH_2.C_6H_5$, flüssig, Sdp. 327 °, d ^{16,5} 1,062.

α-Naphtobenzylalkohol $C_{10}H_7.CH_2OH$, aus α-Naphtobenzylamin mit salpetriger Säure erhalten. Glänzende Nadeln, Fp. 60 °, Sdp. $_{715}$ 301 °.

β-Naphtobenzylalkohol $C_{10}H_7.CH_2OH$, aus β-Naphtobenzylamin mit salpetriger Säure erhalten. Glänzende Blättchen. Fp. 80 °, mit Wasserdämpfen leicht flüchtig.

Phenylnaphtylcarbinol $C_6H_5.CH(OH).C_{10}H_7$ entsteht durch Reduktion von α-Phenylnaphtylketon. Weiße Kristalle, Fp 86,5 °, Sdp über 360 °.

Trinaphtylcarbinol $(C_{10}H_7)_3.COH$, bräunliches Kristallpulver, Fp. 278 °. Fast unlöslich in Alkohol, leicht löslich dagegen in Benzol, Chloroform und Schwefelkohlenstoff.

Fluorenalkohol

CH(OH)

entsteht bei der Reduktion des Diphenylenketons (Fluorenons) $\begin{matrix}C_6H_4\\|\\C_6H_4\end{matrix}\rangle CO$, und beim Erhitzen der Diphenylenglycolsäure

$$\begin{matrix}C_6H_4\\|\\C_6H_4\end{matrix}\rangle C\langle\begin{matrix}OH\\COOH\end{matrix}$$

mit Natronlauge auf 160°, wobei Kohlendioxyd abgespalten wird. Feine weiße Nadeln, Fp. 156°, welche sich beim Uebergießen mit konzentrierter Schwefelsäure blau färben. Durch Oxydationsmittel geht der Alkohol sehr leicht in Fluorenon über.

Retenfluorenalkohol 1-Methyl-4 Isoprophyl-Diphenylenketon

$$CH_3-C-CH_3 \ldots CH(OH) \quad CH_3$$

wird bei der Reduktion des Retenketons

$$\begin{matrix} & C_6H_4 & \\ CH_3 & & >CO \\ & >C_6H_2 & \\ C_3H_7 & & \end{matrix}$$

gewonnen. Lange, seideglänzende Nadeln, Fp. 133°—134°.

Chrysofluorenalkohol, Naphtofluorenol

$$CHOH$$

wird erhalten durch Reduktion des Chrysoketons $C_{17}H_{10}O$. Glänzende Nadeln, Fp. 166° bis 167°.

Picenfluorenalkohol, Dinaphtofluorenol

$$CH(OH)$$

bildet sich bei der Reduktion des Picylenketons (Dinaphtylenketons) $C_{21}H_{12}O$. Weiße, schimmernde Blättchen, Fp. 230°.

d) Mehrwertige Alkohole. o-Xylilenalkohol, Phtalylalkohol $C_6H_4(CH_2OH)_2$ entsteht aus o-Xylilenbromid $C_6H_4.(CH_2Br)_2$ durch Kochen mit Sodalösung. Auch durch Reduktion von Phtalylchlorid $C_6H_4(COCl_2)_2$ mit Natriumamalgam ist es erhalten worden. Farblose Tafeln, Fp 62°. Durch Oxydation geht der Alkohol in Phtalsäure $C_6H_4(COOH)_2$ über.

m-Xylilenalkohol $C_6H_4(\overset{1,3}{C}H_2OH)_2$, farblose Kristalle, Fp 46°—47°. d^{53} 1,135.

p-Xylilenalkohol $C_6H_4(\overset{1,4}{C}H_2OH)_2$, farblose Nadeln, Fp. 112°—113°. Bei der Oxydation entsteht Terephtalsäure $C_6H_4(COOH)_2$.

Pseudocumenylalkohol $\overset{1}{C}H_3.C_6H_3(\overset{2,4}{C}H_2OH)_2$, Fp. 77,5°.

Mesitylenglycol $\overset{1}{C}H_3.C_6H_5(\overset{3,5}{C}H_2OH)_2$, dickes Oel, Sdp.$_{20}$ 190°.

Mesicerin $C_6H_3(\overset{1,3,5}{C}H_2OH)_3$, dickes Oel, in Aether unlöslich.

Styrolenalkohol, Phenylglycol $C_6H_5.CHOH.CH_2OH$, entsteht aus Styroldibromid $C_6H_5.CHBr.CH_2Br$ durch Kochen mit wässeriger Kaliumkarbonatlösung. Feine Nadeln, Fp. 67°, Sdp. 273°. Bei der Oxydation mit Chromsäure wird Benzaldehyd gebildet; Salpetersäure oxydiert zu Benzoylcarbinol $C_6H_5.CO.CH_2OH$ und Benzoylameisensäure $C_6H_5.CO.COOH$. Bei der Behandlung mit verdünnter Schwefelsäure findet eine Kondensation zweier Moleküle des Alkohols zu β-Phenylnaphtalin statt.

$$\begin{matrix} CH & CH_2OH \\ OH & OH \\ HO-CH_2 & -CH-C_6H_5 \end{matrix} = C_6H_5 + 4\,H_2O$$

Phenylmethylglycol $C_6H_5.\overset{*}{C}HOH.\overset{*}{C}HOH.CH_3$, existiert in zwei Formen, welche vermutlich der Mesoweinsäure und der Traubensäure entsprechen, da das Glycol zwei asymmetrische Kohlenstoffe enthält.

α-Modifikation, Fp. 53°; β-Modifikation, Fp. 93°.

Phenylbutylenglycol, $C_6H_5.CHOH.CH_2.CH_2.CH_2OH$, Fp. 75°, Sdp. 200°.

Phenyl-isopropyl-äthylenglycol $C_6H_5.CHOH.CHOH.CH<^{CH_3}_{CH_3}$ Fp. 81°—82°, Sdp. 286°—287°.

Aus Eugenol, Isoeugenol, Safrol und Isosafrol sind durch Oxydation mit Permanganat in sodaalkalischer Lösung folgende Glycole erhalten

4-Oxy-3-methoxybenzylglycol $\overset{4}{O}H(\overset{3}{C}H_3O).C_6H_3.\overset{1}{C}H_2.CHOH.CH_2OH$. Fp. 68°.

4-Oxy-3-methoxyphenylmethylglycol $\overset{4}{O}H(\overset{3}{C}H_3O).C_6H_3.\overset{1}{C}HOH.CHOH.CH_3$. Fp. 88°.

Methylen-3,4-dioxybenzylglycol

$$CH_2<^{O}_{O}>^{3,4}C_6H_3.CH_2.CHOH.CH_2OH,$$

Fp. 82°.

Methylen-3,4-dioxyphenyl-Methyl-glycol

$$CH_2<^{O}_{O}>^{3,4}C_6H_3.\overset{1}{C}HOH.CHOH.CH_3.\ Fp. 101°.$$

Stycerin $C_6H_5.CHOH.CHOH.CH_2OH$, hellgelbe, gummiartige Masse, leicht löslich in Wasser und Alkohol, nicht in Aether. Es entsteht durch Kochen von Styrondibromid $C_6H_5.CHBr.CHBr.CH_2OH$ mit Wasser, oder durch Oxydation von Zimmtalkohol $C_6H_5.CH{=}CH.CH_2OH$ in sodaalkalischer Lösung mit Permanganat.

Hydrobenzoïn, Diphenylglycol $C_6H_5.\overset{*}{C}HOH.\overset{*}{C}HOH.C_6H_5$ und Isohydrobenzoïn von gleicher Formel entstehen neben Benzylalkohol bei der Reduktion von Benzaldehyd in wässerig-alkoholischer Lösung mit Natriumamalgam, ferner aus Stilbendibromid oder -chlorid $C_6H_5.CHBr.CHBr.C_6H_5$, wenn man diese Substanzen mit Silberacetat oder Silberbenzoat in die entsprechenden Hydrobenzoinester überführt und diese dann verseift. Hydrobenzoïn und Isohydrobenzoïn sind beide optisch inaktiv, enthalten aber zwei asymmetrische Kohlenstoffatome. Das Isohydrobenzoïn kristallisiert in rechts- und linkshemiedrisch ausgebildeten Kristallen und es ist gelungen durch Auslesen entantiomorpher Kristalle zwei Hydrobenzoïne von entgegengesetztem Drehungsvermögen zu erhalten (Erlenmeyer jun.). Die vier Hydrobenzoïne entsprechen somit den vier theoretisch möglichen Stereoisomeren beim Vorhandensein zweier asymmetrischer Kohlenstoffe

I	II	III
C_6H_5	C_6H_5	C_6H_5
H—C—OH	HO—C—H	H—C—OH
HO—C—H	H—C—OH	H—C—OH
C_6H_5	C_6H_5	C_6H_5
r-Hydrobenzoïn	l-Hydrobenzoïn	i-Hydrobenzoïn

IV = (I + II) razemisches Gemisch der Formen I und II Isohydrobenzoïn

Durch Oxydation gehen die Hydrobenzoïne in Benzoïn $C_6H_5.CHOH.CO.C_6H_5$ und Benzil $C_6H_5.CO.CO.C_6H_5$ über, durch Phosphorpentachlorid in α- und β-Stilbenchlorid. Hydrobenzoin bildet glänzende Blättchen Fp. 138°, welche sich in Wasser schwer lösen. Isohydrobenzoin löst sich leichter in Wasser und kristallisiert daraus in wasserhaltigen Kristallen, Fp. 95°—96°. Wasserfrei schmilzt es bei 119,5°.

Acetophenonpinakon, 1,2-Diphenyl-1,2-dimethylglycol

$$\frac{CH_3}{C_6H_5}\rangle COH—COH\langle\frac{CH_3}{C_6H_5}$$

entsteht bei der Reduktion von Acetophenon $C_6H_5.CO.CH_3$, Fp. 120°. Unlöslich in Wasser.

Methyl-p-Tolylpinakon,

$$\frac{CH_3}{CH_3.C_6H_4}\rangle COH—COH\langle\frac{CH_3}{C_6H_4.CH_3}$$

bildet sich bei der Reduktion von Methyl-p-Tolylketon $CH_3.CO.C_6H_4CH_3$, Fp. 90°, sublimiert leicht.

Propylphenyl-pinakon

$$\frac{C_3H_7}{C_6H_5}\rangle C(OH)—C(OH)\langle\frac{C_3H_7}{C_6H_5}$$

entsteht bei der Reduktion von n-Propylphenylketon $C_3H_7.CO.C_6H_5$, Fp. 64°.

Isopropylphenylpinakon

$$\frac{CH_3}{CH_3}\rangle\frac{CH}{C_6H_5}\rangle COH—COH\langle\frac{CH}{C_6H_5}\langle\frac{CH_3}{CH_3}$$

bei der Reduktion von Isopropylphenylketon $\frac{CH_3}{CH_3}\rangle CH—CO—C_6H_5$ erhalten. Fp. 96°.

Hydrocuminoïn $(CH_3)_2\overset{1}{C}H.C_6H_4.\overset{1}{C}HOH.CHOH.C_6H_4.CH(CH_3)_2$ entsteht bei der Reduktion von Cuminaldehyd $(CH_3)_2CH.C_6H_4.CHO$ oder Cuminoïn $(CH_3)_2CH.C_6H_4.CHOH.CO.C_6H_4.CH(CH_3)_2$ mit Natriumamalgam. Kleine Nadeln, Fp. 135°.

Benzpinakon, Tetraphenyläthylenglycol $\frac{C_6H_5}{C_6H_5}\rangle COH—COH\langle\frac{C_6H_5}{C_6H_5}$, entsteht bei der Reduktion von Benzophonen mit Zink und Schwefelsäure. Kleine glänzende Prismen, Fp. 168°. Das Pinakon ist wenig beständig. Beim Schmelzen zersetzt es sich vollständig in Benzophenon und Benzhydrol eine Reaktion sich auch beim Kochen mit alkoholischem Kali vollzieht $(C_6H_5)_2COH.COH(C_6H_5)_2 = (C_6H_5)_2CO + (C_6H_5)_2CHOH$.

Beim Erhitzen mit Acetylchlorid oder Benzoylchlorid, oder mit Eisessig und Halogenwasserstoffsäuren oder verdünnter Schwefelsäure geht das Pinakon glatt unter Wasserabspaltung in β-Benzpinakolin über $(C_6H_5)_3.C.CO.C_6H_5$. Je nach den Bedingungen entsteht mitunter daneben auch α-Benzpinakolin $(C_6H_5)_2.C — C.(C_6H_5)_2$ (über O verbunden), welches wiederum sehr leicht in β-Benzpinakolin übergeht. Bei der Reduktion des Benzpinakons mit Jodwasserstoff und Phosphor entsteht Tetraphenyläthan.

Phenyl-p-tolylpinakon

$$\frac{C_6H_5}{CH_3.C_6H_4}\rangle COH—COH\langle\frac{C_6H_5}{C_6H_4.CH_3}$$

wird gewonnen bei der Reduktion von Phenyltolylketon $C_6H_5.CO.C_6H_4.CH_3$. Mikroskopische Nadeln, Fp. 164° bis 165°. Das Pinakon erleidet dieselben Verwandlungen wie das Benzpinakon: Beim Schmelzen zerfällt es in Tolylphenylketon und Tolylphenylcarbinol. Die Umwandlung in ein α-Pinakolin

$$\frac{C_6H_5}{CH_3.C_6H_4}\rangle C \underset{\diagdown O \diagup}{—} C\langle\frac{C_6H_5}{C_6H_4.CH_3}$$

und β-Pinakokolin

$$\begin{matrix} C_6H_5 \\ CH_3.C_6H_4 \\ CH_3.C_6H_4 \end{matrix}\rangle C.CO.C_6H_5$$

findet ebenso leicht und unter denselben Bedingungen statt.

α-Desoxybenzoïnpinakon $\begin{matrix} C_6H_5 & \overset{*}{C}OH & \overset{*}{C}OH & C_6H_5 \\ C_6H_5CH_2 & & & CH_2.C_6H_5 \end{matrix}$ entsteht neben *β*-Desoxybenzoïnpinakon bei der Reduktion von Benzoïn $C_6H_5.CHOH.CO.C_6H_5$ mit Zinkstaub in Eisessig. Auch das Desoxybenzoïn $C_6H_5.CH_2.CO.C_6H_5$ liefert bei der Reduktion in alkoholischer Lösung die beiden Pinakone. Flache Nadeln, Fp. 213⁰. Bei der Destillation zersetzt sich das Pinakon in Desoxybenzoïn und Toluylenhydrat $C_6H_5.CH_2.CHOH.C_6H_5$.

β-Desoxybenzoïnpinakon von gleicher Formel, Fp. 172⁰, zersetzt sich beim Destillieren genau so wie die *α*-Verbindung. Da die Desoxybenzoïne zwei asymetrische Kohlenstoffatome besitzen, beruht ihre Isomerie wahrscheinlich auf denselben Ursachen wie beim Hydrobenzoïn und Isohydrobenzoïn (s. d.).

Dioxytetraphenylbutan $\begin{matrix} C_6H_5-CHOH-CH-C_6H_5 \\ | \\ C_6H_5-CHOH-CH-C_6H_5 \end{matrix}$, eine mit den Desoxybenzoïnpinakonen isomere Substanz, entsteht bei der Reduktion von Benzoïn in alkoholischer Lösung mit Natrium, Fp. 61⁰.

Benzoïnpinakon $\begin{matrix} C_6H_5.CHOH.C(OH)-C_6H_5 \\ | \\ C_6H_5.CHOH.C(OH)-C_6H_5 \end{matrix}$ entsteht durch Einwirkung von Zink und Salzsäure oder Natriumamalgam und Alkohol auf Benzoïn. Glasglänzende Prismen, Fp. 208⁰.

Di-p-Oxyhydrobenzoïn $\overset{4}{HO}.C_6H_4.\overset{1}{C}HOH.\overset{1}{C}HOH.C_6H_4.\overset{4}{O}H$ bildet sich bei der Reduktion von p-Oxybenzaldehyd $\overset{4}{O}H.C_6H_4.\overset{1}{C}HO$, neben dem Di-p-Oxyisohydrobenzoïn, Fp. 222⁰, leicht löslich in siedendem Wasser.

Di-p-oxyisohydrobenzoïn, von gleicher Formel, Fp. 197,5⁰, gibt mit Eisenchlorid vorübergehende Blaufärbung.

Hydranisoïn $CH_3\overset{4}{O}.C_6H_4.\overset{1}{C}HOH.\overset{1}{C}HOH.C_6H_4.\overset{4}{O}CH_3$ entsteht neben Isohydranisoïn bei der Reduktion von Anisaldehyd $CH_3\overset{4}{O}.C_6H_4.\overset{1}{C}HO$ mit Natriumamalgam und Wasser. Dünne Tafeln, Fp. 168⁰, in kaltem Wasser und in Aether kaum löslich. Beim Kochen mit verdünnter Schwefelsäure wandelt es sich um in Desoxyanisoïn $CH_3O.C_6H_4.CH_2.CO.C_6H_4.OCH_3$.

Isohydranisoïn, von gleicher Formel, Fp. 125⁰, ist in Aether leicht löslich, verhält sich aber sonst ganz gleich wie Hydroanisoïn.

Hydrovanilloïn $\overset{4}{H}O(CH_3\overset{3}{O})C_6H_3.\overset{1}{C}HOH.\overset{1}{C}HOH.C_6H_3(\overset{3}{O}CH_3)\overset{4}{O}H$ bildet sich neben dem Vanillylalkohol bei der Einwirkung von Natriumamalgam und wässerigem Alkohol auf Vanillin $\overset{3}{O}H(CH_3\overset{4}{O})C_6H_3.\overset{1}{C}HO$. Kleine Prismen, Fp. 222⁰—225⁰ unter Zersetzung, welche sich in verdünnter Kalilauge leicht lösen. Mit konzentrierter Schwefelsäure färben sich die Kristalle glänzend grün und lösen sich mit rotvioletter Farbe in ihr auf. In Aether ist das Hydrovanillin schwer löslich. Sein Geruch erinnert an Vanillin, in welches es bei gelinder Oxydation leicht übergeht.

Hydropiperoin $CH_2\overset{3.4}{<^O_O>}\overset{1}{C_6H_3}.CHOH.\overset{1}{C}HOH.C_6H_3\overset{3.4}{<^O_O>}CH_2$ entsteht neben Isohydropiperoïn und Piperonylalkohol beim Behandeln von Piperonal $CH_2O_2:C_6H_3.CHO$ mit Natriumamalgam und Wasser. Glänzende Prismen, Fp. 202⁰, welche in Wasser und Alkohol schwer löslich sind.

Isohydropiperoïn, von gleicher Formel, bildet seidenglänzende Nadeln, welche in Wasser und Alkohol ziemlich löslich sind, Fp. 135⁰.

Anthrapinakon

$$CH_2<^{C_6H_4}_{C_6H_4}>COH-COH<^{C_6H_4}_{C_6H_4}>CH_2$$

wird erhalten bei der Reduktion von Anthrachinon $CO<^{C_6H_4}_{C_6H_4}>CO$ mit Zinkstaub und Ammoniak. Feine Nadeln, Fp. 182⁰ unter Zersetzung.

2 C. Hydroaromatische Alkohole. Cyclohexanol (Hexahydrophenol), $CH_2<^{CH_2-CH_2}_{CH_2-CH_2}>CHOH$ entsteht aus Ketohexamethylen $C_6H_{10}O$ durch Reduktion mittels Natrium und Alkohol, oder durch Einwirkung von salpetriger Säure auf Amidohexamethylen. Aus dem Chinit (s. u.) läßt sich der Alkohol durch Behandeln mit Jodwasserstoff und darauf folgender Reduktion des entstandenen p-Jodhexahydrophenols erhalten. Fp. 16⁰—17⁰, Sdp. 160,5⁰, d^{20}_4 0,9440, in Wasser ziemlich löslich. Der Geruch erinnert an Kampfer und an Fuselöl. Natrium löst sich in dem Alkohol beim Erwärmen auf unter Bildung des Alkoholates. Bei der Oxydation mit Salpetersäure entsteht Adipinsäure $HOOC(CH_2)_4COOH$, mit Chromsäure Ketohexamethylen.

Trans-1-Methylcyklohexanol (3), Hexahydro-m-Kresol

$$CH_2<^{CH_2-CH_2}_{\underset{|}{CH}-CH_2}>CHOH \quad (CH \text{ trägt } CH_3)$$

CH_3

und ebenso die cis-Verbindung wurden durch Reduktion von Methylcyclohexanon dargestellt. Trans-Form Sdp. 174⁰—175⁰, $d^{16.5^0}$

0,9228; Cis-Form Sdp. 174°—195°, d^{16} 0,9191.

1-Methylcyclohexanol (2)

$$CH_2\left\langle\begin{matrix}CH_2-CH_2\\CH_2-CH\end{matrix}\right\rangle CHOH,\quad \searrow CH_3$$

Sdp. 168—169° d^{17} 0,9225.

1,3-Dimethylcyclohexanol (2), Hexahydro m-Xylenol

$$CH_2\left\langle\begin{matrix}CH_2-CH\langle^{CH_3}\\CH_2-CH\langle_{CH_3}\end{matrix}\right\rangle CHOH,\ \text{Sdp. } 174{,}5^0$$

1,3 - Diäthylcyclohexanol, Hexahydrodiäthylphenol

$$CH_2\left\langle\begin{matrix}CH_2-CH\langle^{C_2H_5}\\CH_2-CH\langle_{C_2H_5}\end{matrix}\right\rangle CHOH,\ \text{Fp. } 77^0-78^0$$

Cyclohexandiol (1,2), 1,2 Dioxyhexahydrobenzol

$$CH_2\left\langle\begin{matrix}CH_2-CH_2\\CH_2-CH\end{matrix}\right\rangle CHOH,\quad \searrow OH$$

entsteht aus Tetrahydrobenzol

$$CH_2\left\langle\begin{matrix}CH_2-CH_2\\CH_2-CH\end{matrix}\right\rangle CH$$

durch Oxydation mit verdünnter Permanganatlösung, Fp. 99°—100°.

Chinit, Cyclohexandiol (1,4)

$$HOHC\left\langle\begin{matrix}CH_2-CH_2\\CH_2-CH_2\end{matrix}\right\rangle CHOH$$

bildet sich aus p-Diketohexamethylen, welches aus Succinylobernsteinsäureester hergestellt wird, bei der Behandlung mit Natriumamalgam unter gleichzeitigem Durchleiten von Kohlensäure. Anscheinend entsteht hierbei ein Gemisch von cis-trans-isomeren Formen, Fp. 143° bis 145°. Bei der Oxydation mit Chromsäure bildet sich Chinon (daher der Name).

Phloroglucit, Cyclohexantriol (1, 3, 5)

$$CH_2\left\langle\begin{matrix}CH(OH)-CH_2\\CH(OH)-CH_2\end{matrix}\right\rangle CH(OH)$$

entsteht aus Phloroglucin $C_6H_3\overset{1,3,5}{(OH)_3}$ durch Reduktion mit Natriumamalgam. Es kristallisiert aus Wasser in kristallwasserhaltigen Rhomboëdern, Fp. 115°. Wasserfrei schmilzt die Verbindung bei 184°. Das Phloroglucit schmeckt schwach süß.

Quercit, Cyclohexanpentol (1, 2, 3, 4, 5), Eichelzucker

$$CH_2\left\langle\begin{matrix}CH(OH)-CH(OH)\\CH(OH)-CH(OH)\end{matrix}\right\rangle CH(OH),$$

findet sich in den Eicheln. Aus dem wässerigen Auszug derselben wird er durch Zusatz von Bierhefe gewonnen. Bei der entstehenden Gärung werden die Glycosen zerstört, der Quercit bleibt aber erhalten. Farblose, monokline Prismen, Fp. 234°, d^{13} 1,584, $[\alpha]_D^{16} = +24^0\ 16'$. Der Quercit schmeckt süß und zeigt viele Analogien zu den um zwei Wasserstoffatome reicheren Alkohol der Fettreihe Rhamnit: $CH_3.(CHOH)_4.CH_2OH$. Bei der Oxydation mit Salpetersäure entsteht Schleimsäure $HOOC(CHOH)_4COOH$ und Trioxyglutarsäure $HOOC(CHOH)_3COOH$, mit Kaliumpermanganat neben Kohlendioxyd und Oxalsäure hauptsächlich Malonsäure $HOOC.CH_2.COOH$.

Bei der Reduktion mit Jodwasserstoff wurden Benzol, Phenol, Pyrogallol, Hydrochinon, Chinon und Hexan erhalten. Ein Pentaacetylderivat und ein Pentanitrat entsteht bei der Einwirkung von Essigsäureanhydrid oder rauchender Salpetersäure.

Inosit, Hexaoxyhexamethylen, Cyclohexanhexol (1, 2, 3, 4, 5, 6)

$$CHOH\left\langle\begin{matrix}CHOH-CHOH\\CHOH-CHOH\end{matrix}\right\rangle CHOH$$

existiert in vier verschiedenen Modifikationen: einer inaktiven nicht spaltbaren und einer inaktiven spaltbaren (razemischen) Form, sowie in zwei optisch aktiven im entgegengesetzten Sinne drehenden Formen. Diese Tatsache ist in theoretischer Beziehung sehr bedeutungsvoll, weil die Formel des Inosits kein eigentlich asymmetrisches Kohlenstoffatom besitzt. Man erklärt das Auftreten optisch-aktiver Isomeren durch die Annahme verschiedener Lagerung der H- und OH-Atome am Kohlenstoffskelett derart, daß keine Symmetrieebene vorhanden ist. Die Raumformeln der beiden optisch-aktiven Inosite ergeben sich danach folgendermaßen

```
            HO      H
HO          C ———— C       OH
C     H   H   H   OH    C        und
H     C ———— C             H
      OH      OH

      H         OH
HO    C ———— C          OH
C  <  OH   H   H   H   > C
H        C ———— C'       H
         OH       OH
```

i-Inosit (Meso-Inosit, Phaseomannit, Nucit) ist ganz außerordentlich verbreitet im Pflanzen- und Tierreich. Er wurde zuerst im Muskelsaft aufgefunden (Scherer 1850), dann noch in vielen anderen tierischen Organen und Sekreten nachgewiesen. Er findet sich ferner in den grünen Schnittbohnen und Erbsen und in vielen Blättern, Pilzen, Samen und Pflanzensäften. Je nach ihrer verschiedenen Quelle bekam die Substanz immer verschiedene Namen, bis man später die Identität aller dieser Präparate entdeckte. Auch die Dambose aus Kautschuk ist identisch mit i-Inosit. In Form den Monomethyläthers $C_6H_{11}O_5.OCH_3$ kommt der i-Inosit noch als Bornesit im Kautschuk von Borneo vor, in Form des Dimethyläthers $C_6H_{10}O_4(OCH_3)_2$ als Dambonit im Kautschuk von Gabon. Jodwasserstoff spaltet beide Aether in Jodmethyl und i-Inosit (Maquenne).

i-Inosit kristallisiert aus Wasser unterhalb 50° in großen monoklinischen Kristallen, welche zwei Mol Kristallwasser enthalten, oberhalb 50° in wasserfreien Nadeln, Fp 225°, d^{12} 1,752. Kleine Quantitäten kann man beim vorsichtigen Erhitzen unzersetzt sublimieren. Der i-Inonit ist eine sehr süß schmeckende Substanz, die in Wasser ziemlich leicht, in Alkohol schwer, in Aether gar nicht löslich ist. Die Konstitution des Inosits, welche 1887 von Maquenne ermittelt wurde, ergibt sich aus seinem Oxydations- und Reduktionsprodukten. Bei der Reduktion mit Jodwasserstoff bildet sich Benzol, Phenol und Trijodphenol. Durch Oxydation mit Salpetersäure entstehen Tetraoxychinon

$$OC\langle{CHOH-CHOH \atop CHOH-CHOH}\rangle CO.$$

Rhodizonsäure

$$OC\langle{CHOH-CHOH \atop CO- \quad\quad CO}\rangle CO$$

und Trichinoyl

$$OC\langle{CO-CO \atop CO-CO}\rangle CO.$$

Ein Hexaacetat wird durch Behandlung mit Essigsäureanhydrid und Chlorzink erhalten.

Der i-Inosit reduziert Fehlingsche Lösung nicht und wird auch durch Saccharomyceten nicht in Gärung versetzt.

d-Inosit, kommt in Form seines Monomethyläthers in der Natur vor, und zwar als Pinit im Safte von Pinus lambertina, als Matezit im Kautschuk von Madagaskar und als Sennit in den Sennesblättern. Alle diese drei Naturprodukte sind identisch und liefern mit Jodwasserstoff Jodmethyl und d-Inosit.

Der d-Inosit bildet wasserfreie Octaëder oder wasserhaltige Nadeln $C_6H_{12}O_6 + 2H_2O$, Fp. 247°.

$[\alpha]_D = + 68{,}4$ ohne Multirotation. Sein sonstiges Verhalten gleicht vollkommen dem des i-Inosits.

l-Inosit findet sich in Form seines Monomethyläthers als Quebrachit in der Quebrachorinde und kann daraus durch Behandlung mit Jodwasserstoff gewonnen werden. Er bildet wasserfreie Kristalle oder ein Hydrat $C_6H_{12}O_6 + 2H_2O$, Fp. 247°, $[\alpha]_D = - 65°$.

rac-Inosit bildet sich beim Vermischen der Lösungen der beiden optisch aktiven Inosite, und ist in Wasser schwerer löslich als diese, Fp. 253°.

Tetrahydrophenol

$$CH\langle{CH-CH \atop CH_2-CH_2}\rangle OHOH,$$ Sdp. 166°, bildet sich aus p-Jodcyclohexanol, das aus Chinit durch Behandlung mit Jodwasserstoff entsteht (s. Cyclohexanol), durch Destillation mit Chinolin, wobei Jodwasserstoff abgespalten wird

$$J.HC\langle{CH_2-CH_2 \atop CH_2-CH_2}\rangle CHOH$$

$$= HC\langle{CH-CH_2 \atop CH_2-CH_2}\rangle CHOH + HJ$$

Eine Reihe von hydroaromatischen Alkoholen, die sich vom Hexahydrocymol

$${CH_3 \atop CH_3} CH-CH\langle{CH_2-CH_2 \atop CH_2-CH_2}\rangle CH-CH_3$$

ableitet, gehört zur großen Klasse der Terpene und wird dort gesondert behandelt (vgl. den Artikel „Terpene").

2 D. Heterocyklische Alkohole.

Furfuralkohol
$$\begin{matrix} CH=C-CH_2OH \\ | \quad\quad O \\ CH=CH \end{matrix}$$
entsteht durch Reduktion von Furfurol $C_4H_3O.CHO$, oder durch Einwirkung von alkoholischem Kali auf diesen Aldehyd, wobei sich gleichzeitig Furfurancarbonsäure (Pyroschleimsäure) bildet.

$$\underset{\text{Furfurol}}{2C_4H_3O\ CHO} + KOH = \underset{\text{Furfuralkohol}}{C_4H_3O\ CH_2OH} + \underset{\text{Pyroschleimsaures K}}{C_4H_3O.COOK}$$

Der Alkohol stellt eine sirupartige Flüssigkeit dar, die sich in Wasser, Alkohol und Aether löst und mit Salzsäure eine Grünfärbung gibt.

Xanthydrol $C_6H_4\langle{CHOH \atop O}\rangle C_6H_4$

entsteht bei vorsichtiger Reduktion von Xanthon

$C_6H_4\langle^{CO}_{O}\rangle C_6H_4$

und ähnelt in seiner Eigenschaft außerordentlich dem Benzhydrol.

α-Picolylalkin

$C_5H_4N.CH_2.CH_2OH$

entsteht durch Erhitzen von *α*-Picolin C_6H_7N mit Formaldehyd und Wasser. Farblose, syrupartige Flüssigkeit, Sdp_9 114°—116°, $d^0 = 1{,}111$, welche sich bei Destillation unter gewöhnlichem Druck zerlegt und sich in Wasser und Alkohol leicht löst.

α-Picolylmethylalkin

$C_5H_4N.CH_2.CHOH.CH_3$

bildet sich beim Erhitzen von *α*-Picolin mit Acetaldehyd und Wasser auf 160°. Große Kristalle, Fp. 32°, Sdp_{13} 113,5°, welche in Wasser und Alkohol leicht, in Aether schwer löslich sind.

α-Lutidylalkin

$C_5H_4N.CH_2.CH_2.CH_2OH$

wird gewonnen beim Erhitzen von *α*-Aethylpyridin mit Formaldehyd auf 160° und bildet ein dickes Oel, $Sdp._{17}$ 128°—131°, welches in Wasser und Alkohol leicht, in Aether schwer löslich ist.

Pyridyl-*α*-äthylalkin

$C_5H_4N.CHOH.C_2H_5$

entsteht durch Reduktion von Pyridylaethylketon, Sdp. 213°—218°.

α-Picolyläthylalkin

$C_5H_4N.CH_2.CHOH.C_2H_5$

aus *α*-Picolin und Propionaldehyd hergestellt, $Sdp._{18}$ 125—127°.

5-Aethyl-1-Picolylalkin

$C_5H_3N(C_2H_5).CH_2.CH_2OH$

$Sdp._{18}$ 147—149°, d_0 1,066.

Piperäthylalkin

$CH_2\langle^{CH_2-CH_2}_{CH_2-CH_2}\rangle N.CH_2.CH_2OH$

entsteht aus Piperidin $C_5H_{11}N$ und Aethylenchlorhydrin. Farblose Flüssigkeit, Sdp. 199°, in Wasser löslich.

Piperpropylalkin

$CH_2\langle^{CH_2-CH_2}_{CH_2-CH_2}\rangle N.CH_2.CH_2.CH_2OH,$

Sdp. 194°, d^0 0,946, in Wasser leicht löslich.

Piperpropylglycolin

$CH_2\langle^{CH_2-CH_2}_{CH_2-CH_2}\rangle N.CH_2.CHOH.CH_2OH$

entsteht aus Glycerin-monochlorhydrin und Piperidin. Seideglänzende Blättchen, Fp. 72° bis 73°, $Sdp._{195}$ 226°—228°. In Wasser und Alkohol leicht, in Aether schwer löslich.

Literatur. ***F. Beilstein,*** *Handbuch der organischen Chemie. Hamburg und Leipzig 1904.*

G. Reddelien.

Allman

George James.

Geboren 1812 zu Cork; gestorben 1898 in Ardmore (Dorset). Er war Professor der Naturwissenschaft und Museumsdirektor in Edinburg. Ursprünglich war er Jurist, dann Mediziner, um sich aber schließlich der Naturwissenschaft, insbesondere der marinen Zoologie zu widmen. Sein Hauptverdienst liegt in seinen Untersuchungen über die Klassifikation und die Morphologie der Coelenterata und Polyzoa. Im Jahre 1870 zog er sich von seinem Amte zurück, und nahm nun reges Interesse an der Popularisierung der Naturwissenschaft. Er war einer der ersten Mitbegründer und Förderer der British Association for the Advancement of Science und hat auch später viel zur Förderung dieser Gesellschaft beigetragen. Seine Hauptwerke sind Monograph of the Freshwater Polyzoa Published by the Ray Society 1856; A Monograph of the Gymnoblastic or Tubularian Hydroids Ebenda 1871/72. Außerdem war er Bearbeiter der Hydroiden in den Memoirs of the Museum of Comparative Zoology at Harvard Vol 5 Part 11 1865 und Challenger Reports Vol. 7 Part. XX 1883. Die Gesamtwerke Allmans im British Museum Library und in Nature.

Literatur. *Dictionary of Nat. Biography Suppl. Vol. I.*

W. Harms.

Allotropie

nennt man die Isomerie oder den Polymorphismus der Elemente (vgl. die Artikel „Isomerie“ und „Kristallchemie“).

Aluminiummineralien.

1. Kryolith. 2. Beauxit.

1. Kryolith $3NaFAlF_3$ (32,70% Na; 54,39% F; 12,85% Al) kristallisiert monoklin holoedrisch, kommt aber meist in derben Massen vor und zwar gangförmig im zinnsteinhaltigen Granit zu Evigtok am Arksutfjord (Grönland), in geringer Menge auch zu Miask (Ural) und am Pike's Peak (Colorado). Früher war das Mineral fast das einzige Ausgangsprodukt zur Gewinnung des Aluminiums; auch in der Emaillefabrikation und zur Herstellung von Milchglas wird es benutzt

2. Beauxit (Hydrargillit) $Al_2O_33H_2O$, wasserhaltige Tonerde, ungefähr 50 bis 70% Al_2O_3 12 bis 40% H_2O, oft auch Eisenoxyd und Kieselsäure in erheblichen Mengen enthaltend. In dichten Massen als Zersetzungsprodukt tonerdehaltiger Gesteine vorkommend, nur der reinere Hydrargillit findet sich kristallisiert (Hexagonal, dann auch Gibbsit genannt). Beauxit bildet einen wesentlichen Bestandteil des in den Tropen häufigen Verwitterungsbodens Laterit. Beauxit wird zur Gewinnung schwefelsaurer Tonerde in der Technik verwertet.

Nach älteren Verfahren wurde Beauxit mit Schwefelsäure unter Druck aufgeschlossen um Aluminiumsulfat herzustellen. Da jedoch die Technik ein sehr eisenarmes Produkt verlangt, so genügt diese Herstellung nicht mehr (zum Leimen von Papier sind höchstens 0,01%, als Beize in der Färberei höchstens 0,001% Eisen zulässig).

Da das Eisenoxyd durch Alkalien ganz ausgefällt wird, liefert Schmelzen mit Soda ein vollkommen eisenfreies Produkt, ebenso auch das bei 3 bis 5 Atmosphären Druck erfolgende Aufschließen mit Natronlauge. Bei mehr als 4% Verunreinigungen durch Kieselsäure rentiert sich die Verarbeitung des Beauxits nicht.

Vorkommen von reinem Beauxit wurde z. B. im Vogelsgebirge, Westerwald, ferner im südlichen Frankreich, Alabama, Georgia, Ostindien festgestellt.

Außer dem Sulfat wird auch das Acetat des Aluminiums vielfach aus dem Beauxit hergestellt und als Beize in der Färberei zum Wasserdichtmachen von Geweben sowie für medizinische Zwecke verwandt.

Gegenwärtig wird das Aluminium des Handels nur aus Tonerde dargestellt, doch bedarf man hierbei des Kryoliths noch zum Einschmelzen der Tonerde, welche im reinen Zustand einen äußerst hohen Schmelzpunkt besitzt, aber von dem leichtschmelzenden Kryolith gut aufgelöst wird.

Da die Preise des natürlichen Kryoliths mehr und mehr steigen, wird hierfür vielfach „künstlicher Kryolith", d. h. durch chemische Prozesse gefällter Stoff sowie auch „Kryolithersatz", bestehend aus anderen Fluoriden, in den Handel gebracht.

E. Sommerfeldt.

Ameisenpflanzen.

1. Einleitung. Historischer Abriß. 2. Die südamerikanischen Ameisenpflanzen. Cecropia adenopus. Die Belt-Müller-Schimpersche Theorie und ihre Gegner. Triplaris, Cordia, Tococa, Maieta, Acacia. 3. Die afrikanischen Ameisenpflanzen Barteria, Buchnerodendron, Canthium, Plectronia, Randia, Cuviera, Scaphopetalum, Flötenakazien. 4. Die indo-malaiischen Ameisenpflanzen Clerodendron, Macaranga, Pterospermum, Gnetum, Humboldtia, Myrmecodia, Hydnophytum. 5. Pflanzen mit extrafloralen Nektarien. Verbreitung, Anordnung, Bau der extrafloralen Nektarien. Die Theorien Delpinos und Schimpers Einwände dagegen. 6. Theoretische Erörterung der mitgeteilten Fälle von Myrmecophilie. 7. Die Bedeutung der Ameisenpflanzen für die Ausbreitung der Pflanzen. Die Myrmecochoren Sernanders. Ameisengärten.

1. Einleitung. Historischer Abriß. Der Begriff der Ameisenpflanzen ist in den Tropen entstanden, wo die Ameisen eine viel bedeutendere Rolle spielen als in den Ländern der gemäßigten Zone. Ueberall sieht man sie dort geschäftig auf den Stämmen, Blättern, Aesten besonders den jungen Trieben herumlaufen oder ruhig in dichten Schwärmen überall da sitzen, wo sich ihnen ein Hohlraum darbietet, in hohlen Aesten, in eingerollten jungen Blättern, in Blüten und Früchten, zwischen den Nebenblättern usw. Oft sieht man auch Nester auf den Pflanzen.

Gewisse Pflanzen beherbergen nun stets besonders große Mengen von Ameisen, was, den Inländern seit langem bekannt, schließlich auch die Aufmerksamkeit der Reisenden erregte. So erwähnen bereits im 17. Jahrhundert Ray die Cecropien in Südamerika, Hermann und Hernandez die dornentragenden Akazien in Mittelamerika und Rumphius die merkwürdigen Myrmecodien und Hydnophyten im malayischen Archipel. Belt war der erste, der (1872) eine engere Beziehung zwischen gewissen amerikanischen Ameisenpflanzen (Cecropia, Acacia, Tococa) und den sie stets bewohnenden Ameisen vermutete und mit der Ansicht, daß die Pflanzen durch Nektarsäfte und andere feste Nahrungskörperchen die Ameisen an sich fesselten und diese ihrerseits als eine Art stehenden Heeres die Pflanzen vor pflanzenfressenden Insekten und Säugetieren schützten, das Vorbild für alle späteren Theorieen über Ameisenpflanzen gab.

Gleichzeitig war auch Delpino zu

derselben Auffassung von den Beziehungen zwischen den extrafloralen Nektarien und den Ameisen gekommen. Die bekanntesten Ameisenpflanzen, die Cecropien, sind von F. Müller genauer studiert worden; Schimper hat dann über sie eine abschließende Theorie aufgestellt. Da heute die Beurteilung der hier in Betracht kommenden Tatsachen nicht mehr so unbestritten wie früher ist, soll auf eine systematische Einteilung der Ameisenpflanzen hier verzichtet und statt dessen eine Uebersicht über die wichtigsten Fälle gegeben werden.

2. Die südamerikanischen Ameisenpflanzen. Von den Cecropien ist die häufigste die in Südbrasilien einheimische, von den Brasilianern Imbauwa benannte Cecropia adenopus Mart. Sie gehört zu den Morazeen. Ein schlanker, ziemlich dünner, mit den dreieckigen Blattnarben bedeckter Stamm, der die Höhe von 12 bis 15 m erreicht, trägt eine Krone kandelaberartig gestellter Seitenzweige, an denen endständige Büschel großer gelappter Blätter mit dornigen Blattstielen sitzen. Der Stamm und die Aeste sind hohl und an den Knoten durch Querplatten in Fächer geteilt. Nach der Mitte zu zeigt der Stamm eine gallenartige Aufschwellung, welche die Stelle bezeichnet, wo das Nest der Ameisen sich befindet. Nach F. Müller und v. Ihering geht die Besiedelung der Bäume durch die Ameisen in folgender Weise vor sich. Das junge befruchtete Weibchen von Azteca Muelleri Emery wirft seine Flügel ab und bohrt sich bei Nacht in eine beliebige Kammer einer jungen 1 bis 2 m hohen Cecropia ein. Es wählt dazu eine flache, rinnenförmige Vertiefung, welche eine dünne, leicht zu durchbohrende Stelle des Stammes darstellt. Sie ist in der Knospenlage der endständigen Blattknospe durch den Druck der Achselknopse entstanden. Nachdem die Königin eingedrungen ist, verstopft sie die Oeffnung mit dem klebrigen Mark. Dieses, sowie eine eigentümliche Wucherung, welche an der Durchbruchstelle nach innen vorwächst, dienen ihr als Nahrung. Sie legt alsbald Eier, und nachdem sie 6 bis 8 Arbeiter aufgezogen hat, öffnet die junge Familie die inzwischen verwachsene Pforte und dringt in eine höher gelegene Kammer ein, indem hier wieder an der dünnen Stelle ein Loch gebohrt wird. Bei diesen Wanderungen kommt es zu erbitterten Kämpfen, wenn sich mehrere Königinnen in dem Baum eingenistet haben. Schließlich verschmelzen alle die in einem Stamm vorhandenen kleineren Ameisenvölker (die Vorkolonien) zu einer großen, nur von einer Königin beherrschten Dauerkolonie, die im oberen Teil des Stammes ihren Sitz hat. Diese Stelle wird auch äußerlich erkennbar, da der Baumstamm hier eine bauchige, gallenartige Aufschwellung zeigt, und könnte geradezu als eine Ameisengalle bezeichnet werden. Das Hauptnest erstreckt sich durch 4 bis 5 Internodien, deren Querwände (ebenso wie alle die übrigen des Stammes) von den Ameisen durchbohrt werden. Außerdem befindet sich meist eine größere Ausfallsöffnung am Stamm, während die Oeffnungen der nur vorübergehend besiedelten Kammern später wieder zuwachsen. Sobald man gegen den Stamm klopft, dringt ein aufgeregter Schwarm von Ameisen hervor, der in dichtem Gewimmel die Oberfläche des Baumes überflutet.

Wovon nähren sich nun die Ameisen? Abgesehen von den Läusezuchten, die sie ebenso wie fast alle pflanzenbewohnenden Ameisen anlegen, kommen als Nahrung die eigenartigen Müllerschen Körperchen in Betracht, welche an der Unterseite des schildartigen Blattpolsters in einem Rasen von braunen Haaren hervorwachsen. Es sind 1,2 mm lange, ovale, weiße, auf kurzen Stielchen sitzende Körperchen, welche reich an Eiweißstoffen und fetten Oelen sind und leicht abfallen. Sie bestehen aus weichem, parenchymatischem Gewebe ohne Gefäßbündel und tragen auf ihrer Spitze eine große Spaltöffnung, sind also Organe, welche entwickelungsgeschichtlich mit den auch sonst verbreiteten Sekretionsorganen (zu denen z.B. auch die Hydathoden gehören) verwandt sind. Diese Körperchen werden von den Ameisen gern gefressen, doch sind sie keineswegs auf sie angewiesen, auch verwenden sie dieselben nicht zur Fütterung der Brut. Außer den Körperchen, welche längere Zeit aus jungen, zwischen den Haaren stehenden Anlagen nachwachsen, fressen auch die Ameisen die Wucherungen, welche von den Durchbohrungsstellen aus in die Kammern hineinwachsen, gelegentlich auch an den Querwänden entstehen und durch Verletzungen bestimmter Art auch künstlich hervorgerufen werden können.

Nach der Ansicht Schimpers sollen nun die Müllerschen Körperchen, sowie die dünnen das Durchbohren erleichtenden Wandstellen Anpassungen an den Ameisenbesuch sein. Sie sollen zwar nicht für diesen Zweck ganz neu entstanden sein, vielmehr besondere Ausgestaltungen bereits vorhandener Anlagen darstellen. Die dünne Stelle geht auf die auch sonst vorkommende Grube zurück, in welcher die Achselknospe liegt, und die Körperchen sind ursprünglich besondere Drüsen. Eine solche Anpassung setzt einen wesentlichen Vorteil voraus, den die Pflanze von seiten ihrer Bewohner genießt. Dieser Vorteil besteht nach Belt, F. Müller und Schimper in dem Schutz, den die als besonders kriegerisch bezeichneten Ameisen gegen die sogenannten Blattschneide-

ameisen gewähren. Letztere haben die Gewohnheit, Blätter sehr verschiedener Pflanzen, aber auch Fruchtschalen, Papier, ja Kleider zu zerschneiden und die Fetzen in ihren Nestern zum Aufbau einer mistbeetartigen, humösen, porösen Masse zu verwenden, in welcher sie, wie *Moeller* zeigte, ein zu einem Hutpilz (*Rhozites gongylophora*) gehöriges Myzel kultivieren. Bestimmte durch Abkneifen der Hyphenenden entstehende Wucherungen des Myzels, die sogenannten *Kohlrabihäufchen*, werden von den Ameisen abgeweidet. Gegen diese zu der Gattung *Atta* gehörigen Blattschneider sollen nun die Cecropien besonders geschützt sein durch ihre Hilfstruppe; Ameisen und Cecropien seien also durch feste Bande gegenseitigen Vorteils miteinander verbunden, könnten ohne einander nicht leben, befänden sich also in echter Symbiose. Gegen diese Auffassung haben auf Grund eingehender Beobachtungen in Brasilien v. *Ihering*, *Ule*, *Fiebrig* verschiedene Einwände vorgebracht. Die Ameisen seien keinesfalls besonders bissig und kriegerisch, richteten ihre Angriffe auch gegen jede beliebige fremde Ameisenart, je gegen Angehörige der eigenen Art, sofern sie aus einem fremden Nest stammten. Gegen andere Eindringlinge, Käfer, Raupen, sowie vor allem gegen das Faultier, das gern die Blätter der Cecropien abweidet, gewährten sie gar keinen Schutz. Ganz fiele dieser weg bei jungen Pflanzen, die ja noch gar keine Ameisen enthielten, auch blieben in anderen Teilen Brasiliens selbst ameisenfreie Cecropien ganz von den Blattschneidern verschont. Die Verheerungen, die diese anrichteten, seien überhaupt sehr übertrieben, fielen z. B. in den Wäldern gar nicht auf und wären zudem nicht größer als der Schaden, den Pflanzenfresser anrichteten. 183 Kolonieen von Blattschneidern verbrauchten erst ebenso viel Gras wie eine Kuh, kurz die Cecropien bedürften der Ameisen ebensowenig, wie der Pudel der Flöhe. Dagegen seien die Ameisen ganz auf die Pflanze angewiesen, seien also eher als Parasiten zu bezeichnen. Ihre Anwesenheit könne dadurch geradezu schädlich werden, daß Spechte angelockt werden, die dem Baum große, gefährliche Wunden zufügen. Auf anderem Wege haben *Huber* und *Buscaglioni* versucht, die regelmäßige Vergesellschaftung der Ameisen und Cecropien zu erklären. Sie meinen, daß die Cecropien ursprünglich aus den Ueberschwemmungsgebieten stammten und sich die Ameisen hier daran gewöhnt hätten, in den hohlen Stämmen Zuflucht zu suchen.

Außer *Cecropia*, welche in jeder Hinsicht am genauesten untersucht ist, kommen noch eine Anzahl weiterer Ameisenpflanzen in Amerika vor, welche Ameisen in hohlen Achsen beherbergen, so *Triplaris americana*, eine Polygonazee, *Cordia nodosa* (Borraginazee), *Duroia hirsuta* (Rubiazee) u. a. Bei den Triplarisarten hausen die Ameisen vornehmlich in den jüngeren Zweigen, halten aber auch im Mark des Hauptstammes einen Gang frei. Um den Baum herum zerstören sie im Radius von einigen Metern jede Vegetation. Sehr eigenartig sind dann die merkwürdigen Blasen, welche sich an der Blattbasis verschiedener weiterer amerikanischer Pflanzen (*Duroia saccifera*, sowie etlichen Melastomatazeen aus den Gattungen *Tococa*, *Maieta* usw. finden. *Schumann*, der sie genauer beschreibt, nimmt an, daß sie Ameisenwohnstätten darstellen. Jedenfalls werden diese Blasen gern von Ameisen in Beschlag genommen. Schließlich sind von den amerikanischen Ameisenpflanzen noch die berühmten, mexikanischen Acaciaarten *Acacia sphaerocephala* und *Acacia spadicigera* zu erwähnen, die bereits *Belt* als typische Ameisenpflanzen bezeichnete. Es sind Sträucher, mit auffallend großen, hohlen, paarig stehenden, an der Basis verwachsenen Dornen. Diese werden von einer kleinen Art von Ameisen bewohnt, welche sich durch Herstellung eines Loches Zugang zu dem Hohlraum verschafft. Auch diese Pflanze wimmelt infolgedessen ganz von Ameisen, wenn sie berührt wird. *Belt* meint, daß sie einen wirksamen Schutz gegen die Blattschneider darstellten und daß Exemplare ohne Ameisen sofort entlaubt würden. Merkwürdig ist nun weiter, daß an der Spitze der Fiederblättchen des doppelt gefiederten Blattes sich je ein kleiner, gelber, birnförmiger Körper befindet, der am entfalteten Blatt schon bei schwacher Berührung abfällt. Er wird von einem Gefäßbündel durchzogen, besitzt aber keine Spaltöffnung auf dem Scheitel. Die Inhaltsstoffe sind die gleichen, wie bei den Müllerschen Körperchen, nämlich Protein und fettes Oel. Auch diese sogenannten *Beltschen Körperchen* können

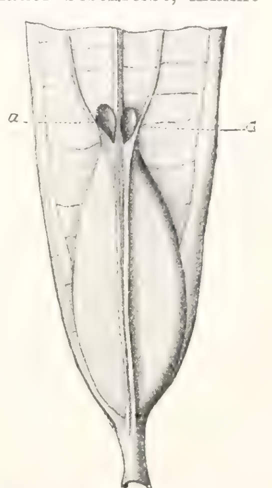


Fig. 1. *Tococa lancifolia*. Blasen an der Blattbasis; a Eingang. Natürliche Größe. Nach K. *Schumann*.

als besondere Typen von Drüsen aufgefaßt werden, wie sie bekanntlich an jungen Blättern besonders häufig auftreten, sollen aber eine besonders auf den Ameisenbesuch berechnete Ausgestaltung erfahren haben, nur diesem Zweck dienen und deshalb geradezu als Ameisenbrötchen zu bezeichnen sein. In der Tat werden sie gern von den Ameisen verzehrt.

3. Die afrikanischen Ameisenpflanzen. Die Typen von Ameisenpflanzen, welche in Amerika vorkommen, treffen wir auch in Afrika an nach den Mitteilungen Schumanns, Kohls, Sjöstedts u. a. Wir haben hier zunächst eine Anzahl Bäume, welche hohle Internodien besitzen. Barteria fistulosa ist in den Urwäldern an den Stanleyfällen sehr häufig, auch wohl im ganzen Kongogebiet sowie in Kamerun verbreitet. Der ungeteilte oder nur spärlich verästelte Stamm, der bis 25 m Höhe erreicht, trägt unter rechtem Winkel abstehende Kurztriebe, von etwa 1,5 m Länge, die eine längsverlaufende einseitige Aufblähung besitzen. Der ganze Seitenzweig nun ist hohl und wird von einer großen gefährlichen Ameise, Sima spininoda bewohnt (die Weibchen erreichen eine Länge von 17 mm). Ihr Stich ist außerordentlich schmerzhaft. Die Höhlung besitzt in ihrem mittleren Teil ein Loch, welches von den Ameisen an einer nicht besonders präformierten Stelle gebohrt wird. Gelegentlich werden die Bäume auch von anderen Ameisen bewohnt. Auch von Barteria fistulosa wird angegeben, daß oft der Boden um den Stamm herum von Pflanzenwuchs gesäubert wird. Trotzdem die Ameisen sehr gefährlich stechen und auch Fleischkost nicht verschmähen, also als Schutztruppe gegen tierische Schädlinge wohl geeignet sind, werden sie doch auch der Pflanze schädlich, indem sie die jungen Blütenknospen und das Markparenchym fressen und überhaupt Rinde und Blätter überall benagen und besonders, indem sie Schildlauszuchten in den hohlen Zweigen anlegen. Aehnliche hohle Zweige mit Zugangsöffnungen, die aber stets von den Ameisen hergestellt werden, oder blasig angeschwollene Internodien kommen noch einer weiteren Zahl mehr oder weniger genau untersuchter afrikanischer Pflanzen zu, z. B. Buchnerodendron speciosum, Canthium glabrifolium, Plectronia Laurentii, verschiedenen Randia- und Cuvieraarten. Auch Pflanzen mit Säckchen an den Blättern finden sich; so hat Scaphopetalum Thonneri (auch in Kamerun) an der Basis der Blattoberseite ein Säckchen, welches eine lokale Ausbauchung der Blätter darstellt und von unten einen Zugang besitzt. Sie werden oft von kleinen schwarzen (wiederum läusezüchtenden) Ameisen bewohnt. Schließlich besitzt auch die afrikanische Flora Acaciaarten mit Hohlräumen, die von Ameisen besiedelt sind, doch entwickeln diese Akazien keine Futterkörperchen an den Fiederblättchen, auch sind die Dornen pathologisch verändert. Es sind nämlich große Gallen, die z. B. bei den in der Massaisteppe um den Kilimandjaro häufigen Flötenakazien sehr auffällig sind. Diese nicht sicher bestimmten kleinen Bäumchen,



Fig. 2. Flötenakazie mit Gallen. a aufgeschnittene Galle mit einem Ameisennest. Etwas verkleinert. Nach Sjöstedt.

welche in großer Individuenzahl über die Steppe zerstreut sind, sind dicht mit etwa kastaniengroßen, schwarzen Gallen besetzt, deren holzige Wände einen Hohlraum umschließen. Berührt man die Gallen, so stürzen nach Sjöstedt sehr aggressive Ameisen hervor, welche an ihrem Hinterleibe ein weißliches, übel duftendes Sekret

ausscheiden. Die Gallen entstehen auch ohne die Ameisen in typischer Weise, die Ameisen okkupieren sie nur, indem sie in die noch jungen Gallen ein bis mehrere Löcher hineinbohren. Diese Löcher sind auch die Ursache des Namens dieser Bäume. Streicht der Wind über den Baum, so entsteht in den Gallen ein sausendes Geräusch. Die Gallen sitzen zu zweien an den Blattachseln, entstehen aber nur zum Teil aus den Stipulardornen selbst, vielmehr beteiligen sich auch der Blattstiel, der Achselsproß oder auch angrenzende Teile der Hauptachse an ihrer Bildung. Welcher Ursache sie ihre Entstehung verdanken, ist nicht bekannt. Sjöstedt ist geneigt, die Ameisenbevölkerung für nützlich zu halten, leugnet jedoch ebenso wie Kohl bei den vorher erwähnten afrikanischen Ameisenpflanzen die Existenz irgendwelcher eigens auf den Ameisenbesuch berechneter Einrichtungen. Die Nektarien auf den Blättern werden nicht benutzt. Andererseits ist auch kein besonderer Nachteil wahrnehmbar, der den Flötenakazien, an die sich eine Reihe weiterer, ebenfalls in Ostafrika beheimateter und sich ähnlich verhaltender Akazien anschließt, aus ihrer Ameisenbevölkerung erwüchse.

4. Die indomalaiischen Ameisenpflanzen. In der indischen und malayischen Flora fehlt es ebenfalls nicht an Ameisenpflanzen. So hat Beccari eine Menge von Pflanzen beschrieben und abgebildet, welche besonders reichlich Ameisen beherbergen und dementsprechend überall besondere Strukturen und Organisationen an der Pflanze als Anpassungen an die Ameisen gedeutet. Wirkliche Beweise dafür werden jedoch nicht beigebracht. Clerodendron fistulosum z. B. in Borneo besitzt, ebenso wie Clerodendron myrmecophilum in Malakka Zweige mit hohlen Internodialräumen, die zahlreichen Ameisen als Wohnstätte dienen. Da am oberen Ende der Internodien unterhalb der Blätter sich zwei durch matteren Glanz ausgezeichnete Partieen befinden, welche wegen ihrer Zusammensetzung aus dünnwandigem Parenchym die Durchbohrung erleichtern und tatsächlich stets die Ameisen hier einen Zugang zu den Hohlräumen schaffen, schließt sich Schimper der Beccarischen Auffassung an und erblickt in Clerodendron fistulosum eine echte Ameisenpflanze. Besondere Nahrungskörper fehlen hier, doch ist die Unterseite der gegenständigen Blätter des etwa 1 m hohen Strauches mit zahlreichen Nektarien bedeckt. Eigentümliche Körperchen, die an die Müllerschen von Cecropia adenopus erinnern, weist dagegen eine in Malakka verbreitete Euphorbiazee, Macaranga triloba, auf. Nach Ridleys Auffassung würde dieser Baum geradezu das altweltliche Seitenstück zu den neuweltlichen Cecropien darstellen. Wie bei vielen anderen Ameisenpflanzen handelt es sich auch hier um einen Baum mit hohlen Internodien, in denen stets große Mengen von Ameisen nisten. Besonders präformierte Stellen zur Anlage von Oeffnungen fehlen hier. Die Laubknospen des etwa 40 Fuß hohen Baumes sind von Knospenschuppen umhüllt, die sich nach dem Austreiben der Knospen zurückbiegen und dem Stamm anlegen, so daß dadurch eine den Stamm an dieser Stelle umziehende Galerie zustande kommt. Auf der Unterseite der Schuppenblätter nun, d. h. also an der Innenwand der durch sie gebildeten Galerie, treten milchweiße, kleine, schmackhaft aussehende Körperchen auf, welche von den Ameisen, die sich in den Galerien gerne aufhalten, abgeweidet werden. Ridley sieht in ihnen besondere Anpassungen, rechnet also Macaranga triloba zu den typischen Ameisenpflanzen, äußert sich jedoch nicht über den etwaigen Gegendienst der Ameisen. Offenbar gehören diese Körperchen wie auch die Müllerschen in eine Kategorie von drüsenartigen Auswüchsen, die auch sonst vorkommen. So besitzen z. B. viele Ampelideen, wie Vitis, Leea, Ampelopsis, an den jungen Trieben, den Blattstielen und den Nerven der Blattunterseite ganz ähnliche weißliche, substanzreiche, oben mit einer Spalte versehene Auswüchse, sogenannte Perldrüsen. Besonders gut, auch an älteren Stengelteilen und Blättern, sind sie bei Ampelopsis quinquefolia zu beobachten. Es ist jedoch nicht bekannt, daß sie von Ameisen aufgesucht werden. Auch bei den Perldrüsen windender Gnetumarten des botanischen Gartens zu Buitenzorg vermochte Raciborski sich nicht davon zu überzeugen, daß sie unter normalen Verhältnissen gefressen werden. Als er jedoch die gewöhnlichen Ameisen des Gartens auf die Körperchen aufmerksam machte, wurden sie in der Tat binnen kurzem abgeweidet. Die Perldrüsen entstehen nur an den langen windenden Sprossen dieser Gnetumarten, nicht an den assimilierenden Kurztrieben. Sie bilden sich reichlich nach einem Regen oder nachts, werden dementsprechend auch in einem feuchten Raum massenhaft zur Entwickelung gebracht. Sie sind sehr hinfällig, indem sie bald verschrumpfen. Ihr Durchmesser beträgt 0,5 mm. Sie enthalten anfänglich viel Stärke, die jedoch später verschwindet. Aehnliche Perldrüsen finden sich bei einem in Java verbreiteten, zu den Sterkuliazeen gehörigen Baum, Pterospermum indicum. Die an den Aesten zweizeilig angeordneten Blätter besitzen an ihren Blattstielen zweierlei Nebenblätter, von denen das eine pfriemlich und hinfällig und nach oben gewandt ist, während

das untere die Gestalt einer abwärts gewandten kleinen Glocke besitzt. An ihrer inneren Wandung stehen in einem Filz von Haaren wieder dicht nebeneinander eine Menge kleiner etwa 0,3 mm großer perlartiger Drüsen, welche reiche Mengen von Fett, Eiweiß, Polysachariden enthalten. Eine schwarze Ameisenart hält sich gern in diesen Glöckchen auf und reißt die Perldrüsen ab, ist aber auch sonst über den ganzen Baum verbreitet. Die merkwürdigen Nebenblätter finden sich nur an den jüngsten Blättern, da sie schon am 3. bis 4. Blatt abfallen. Mit Ausnahme der gleich zu erwähnenden Myrmecodien und Hydnophyten sind die übrigen Ameisenpflanzen selbst bei weiterer Fassung dieses Begriffes nicht mehr als solche aufzufassen. So sind z. B. die eigenartigen schlauchartigen Blätter, welche Dischidia Rafflesiana, eine im malaiischen Archipel verbreitete Schlingpflanze, ausbildet, Organe, in welchen Wasser und Abfallstoffe aufgefangen und durch hineinwachsende Adventivwurzeln für die Pflanze nutzbar gemacht werden. Die blasenartigen Ligularbildungen an den Blattstielen der Rotanarten Korthalsia scaphigera und Korthalsia echinometra sind, wie Ridley betont, keineswegs immer von Ameisen bewohnt, was auch für die Dischidien gilt. Ameisenakazien fehlen in der indischen Flora, doch ist die Beobachtung Ridleys bemerkenswert, daß eine im botanischen Garten von Singapore einheimische Ameisenart die dort angepflanzten Exemplare von Acacia spadicigera in ganz derselben Weise in Beschlag nahm, wie in Amerika. Erwähnenswert ist auch, daß die hohlen Zweige von Ficus inaequalis, die seinerzeit Schimper als Ameisenwohnstätten ansprach, sich inzwischen als pathologische Bildungen herausgestellt haben. Desgleichen hat Escherich in Ceylon bei der von Schumann und Schimper zu den Ameisenpflanzen gerechneten Humboldtia laurifolia keine engere gegenseitige Beziehung zwischen Ameise und Pflanze feststellen können. Auch hier handelt es sich wieder um hohle, blasige Internodien, deren Oeffnung nach Green aber nicht spontan entsteht, sondern erst von den Ameisen genagt wird. Die Ameisen, die keineswegs alle Höhlungen bewohnen, sind vollkommen harmlos. Ihre Anwesenheit schädigt die Pflanze insofern, als ähnlich den Verhältnissen bei Cecropia, Spechte angelockt werden, die die Zweige schwer verwunden. Außerdem ist auch hier ausgedehnte Läusezucht der Ameisen festgestellt worden.

Zweifellos die merkwürdigsten Ameisenpflanzen sind die oft untersuchten und diskutierten knollenbildenden Epiphyten Myrmecodia und Hydnophytum, Rubiazeen, welche ausschließlich auf den malaiischen Archipel und die angrenzenden Bezirke beschränkt sind. Die beiden am besten bekannten Arten sind Myrmecodia tuberosa und Hydnophytum montanum, welche in Java zu Hause sind und sehr häufig in gewissen Gegenden des Westens angetroffen werden. Sie bewohnen, gewöhnlich mit Conchophyllum und Polypodium sinuosum vergesellschaftet, die oberen Regionen licht belaubter Bäume, so z. B. von Durian (Durio zibethinus), Nangka (Artocarpus integrifolia) u. a. Mit dem nicht besonders dicht entwickelten Wurzelsystem klammern sie sich seitlich an den Hauptstämmen oder auf den Zweigen in verschiedener Lage fest. Aeltere und schwerere Exemplare hängen oft mehr oder weniger unter den Aesten. Beide Epiphyten sind durch den Besitz einer großen, aus dem Hypokotyl hervorgehenden Knolle ausgezeichnet, welche bei Hydnophytum glatt oder nur mit Buckeln versehen, gewöhnlich rund und von derber Textur ist, während sie bei Myrmecodia mehr längliche Form hat, aus saftigem Gewebe besteht und an der Oberfläche mit kräftigen, aus Wurzelanlagen hervorgehenden Dornen besetzt ist. Der obere Teil des Stammes ist bei Myrmecodia dick, meist unverzweigt und trägt einen Schopf derber Blätter, bei Hydnophytum entspringen aus der Knolle ein oder mehrere reicher verästelte Zweigsysteme, welche zusammen einen kleinen Busch vorstellen. Die Knolle von Myrmecodia wird über ½ m lang, die von Hydno-



Fig. 3. Myrmecodia tuberosa auf einem Ast sitzend. $^1/_{10}$ natürliche Größe.

phytum erreicht einen Durchmesser von 30 cm. Beide Knollen sind mit sehr merkwürdigen labyrinthischen Hohlräumen durchsetzt, so daß das eigentliche Knollengewebe nur aus mäßig dicken, hin- und hergewundenen, ausgebauchten Platten besteht und einigermaßen an den Bau eines Ameisennestes erinnert. Das Höhlensystem mündet mittels einer oder mehrerer, gewöhnlich am basalen Ende der Knollen gelegener Oeffnungen nach außen. Doch sind außer diesen noch eine große Zahl kleinerer und kleinster Oeffnungen über die Oberfläche verstreut. Klopft man an die Knolle, so stürzt im Augenblick eine wimmelnde Schar von Ameisen heraus, welche die Pflanze in dichten Schwärmen bedecken. Sie sind ziemlich harmlos, ihr Biß ist kaum als schmerzhaft zu bezeichnen. Werden sie nicht gestört,



Fig. 4. Knolle von Hydnophytum montanum längs durchschnitten. 1/5 natürliche Größe.

so verweilen sie tagsüber in der Knolle, ebenso wie die Ameisen, welche das Mark von Endospermum formicarum, einem Baume im Bismarckarchipel aushöhlen, von denen Dahl ebenfalls berichtet, daß sie tagsüber verborgen bleiben. Eigenartig ist es, wie sich die Ameisen im Innern eingerichtet haben. Die Wände des Labyrinthes sind von zweierlei Art; ein Teil ist glatt, hellbraun, der andere mit kleinen Warzen bedeckt und schwärzlich. Nach Miehe deponieren nun die Ameisen (Iridomyrmex myrmecodiae) ihre Puppen nur in den glatten Kammern, während sie ihre Exkremente nur auf den warzigen Kammerwänden ablegen. Diese letzten sind fernerhin noch insofern ausgezeichnet, als auf ihnen (und zwar nur hier) ein Pilz gedeiht, dessen rauchgraue Farbe zusammen mit den bräunlichen Kotüberzügen die abweichende Färbung dieser Kammerwände bedingt. Trotzdem die Ameisen diese Pilzrasen durch Abbeißen kurz halten und das üppige Gedeihen des Pilzes durchaus an das Vorhandensein der echten Ameisenbevölkerung gebunden ist, dient er ihnen wahrscheinlich nicht als Nahrung. Er ist vielmehr wohl nur ein unvermeidliches durch die Abtritte der Ameisen zur Entwickelung gebrachtes Unkraut, das deswegen von den Ameisen rasiert wird, weil es zu einem Verkehrshindernis werden könnte. Da jedoch von anderen Ameisen, besonders den südamerikanischen Attaarten und auch von etlichen Termiten bekannt ist, daß sie Pilze kultivieren und bestimmte gezüchtete Auswüchse der Mycelien auch fressen, ist etwas Aehnliches auch für die Ameisen der Myrmecodia nicht ganz unmöglich, wenngleich das Aussehen des Pilzes sich wesentlich von dem der durch die Attaameisen und die Termiten kultivierten unterscheidet. Die Ameisen, die in den Myrmecodien und den Hydnophyten vorkommen, gehören zu der Art Iridomyrmex myrmecodiae; doch kommt sowohl in Java als auch (nach Dahl) im Bismarckarchipel in Myrmecodien auch gelegentlich eine Camponotusart vor (Camponotus maculatus), eine ziemlich große, aber harmlose Ameise. Bemerkenswert ist, daß beide nicht auf die Ameisenpflanzen beschränkt sind, sondern auch anderswo angetroffen werden, so in Astlöchern, ausgetrockneten, größeren holzigen Früchten, verlassenen Termitennestern usw.

Nachdem Forbes und Treub durch Anzucht von Myrmecodien aus Samen die von Beccari vertretene Ansicht, daß das Labyrinth durch die Tätigkeit der Ameisen hervorgerufen würde, zurückgewiesen hatten, handelte es sich um die Frage, welche ursprüngliche Bedeutung der gekammerten Knolle zukomme. Für die Entscheidung dieser Frage wurde die Feststellung bedeutungsvoll, daß nach jedem Regen Wasser in die Knollenhöhlungen hineingelangt und daß dieses Wasser von der Pflanze mit Hilfe der oben erwähnten Warzen aufgesogen werden kann. Damit wurde die Treubsche Auffassung, daß das Labyrinth und die an seinen Wänden verteilten Warzen Durchlüftungseinrichtungen seien, wesentlich eingeschränkt und statt dessen bewiesen, daß die Knolle, wie es auch Rettig vermutete, neben der Funktion der Wasserspeicherung in erster Linie ein Organ ist, welches das für einen Epiphyten sehr notwendige Wasser auffangen und der Pflanze zuführen soll, daß also auch bei diesen besonders berühmten Ameisenpflanzen sich keine Organisationseigentümlichkeiten finden, welche notwendig

als ursprüngliche Anpassungen an den Ameisenbesuch gedeutet werden könnten. Ob die Ameisen den Pflanzen nicht nebenbei gewissen Schutz angedeihen lassen, ist damit natürlich nicht entschieden, doch erscheint es in Anbetracht der Wehrlosigkeit derselben nicht wahrscheinlich. Sicher ist der Ameisenkot für die Pflanze wichtig, da sie kein Humussammler ist. In der Tat wurden Nitrifikation und somit auch Nitrate innerhalb der Knolle festgestellt.

5. Pflanzen mit extrafloralen Nektarien. Bei den amerikanischen Akazien sprach schon Belt die Ansicht aus, daß die Nektarien, welche sich an den Blattstielen finden, ebenfalls im Dienste der Ameisen stünden. Besonders aber war es Delpino, der diese Theorie in größtem Umfange ausgebaut hat, so daß sich nach seinen und seiner Gefolgsleute Schriften der Kreis der Ameisenpflanzen um die enorme Zahl derjenigen Pflanzen erweiterte, welche extraflorale Nektarien besitzen, und damit auch in der Flora der gemäßigten Zonen eine Anzahl angeblicher Ameisenpflanzen auftauchten.

Unter Nektarien versteht man besondere Organe, welche osmotisch stark wirksame Substanzen, und zwar im allgemeinen Zuckersäfte ausscheiden. Es sind Drüsen, von sehr verschiedenartigem Bau, welche teils in den Blüten teils auch außerhalb der Blüten an verschiedenen Stellen des Pflanzenkörpers vorkommen, jene werden als florale den letzteren als den extrafloralen gegenübergestellt. Die floralen Nektarien werden mit gutem Recht als Anpassungen aufgefaßt, die den Insektenbesuch begünstigen sollen. Insekten verschiedener Art besuchen die mit Nektarsäften ausgestatteten Blüten, beladen sich infolge einer raffiniert zweckmäßigen Organisation der Blüte mit Pollenstaub, und übertragen diesen bei ihren weiteren Besuchen auf die Narben anderer Blüten. Offenbar unter dem Eindruck dieser allgemein akzeptierten Theorie von dem Zusammenhang zwischen honigsaugenden Insekten und der Sicherung der Fremdbestäubung, hat man den Versuch gemacht, eine ähnliche Beziehung zwischen den extrafloralen Nektarien und den Ameisen zu konstruieren. Die Ameisen sollten den Nektar schlürfen, sich so an die Pflanze gewöhnen und diese nun gleich einer Schutztruppe gegen Feinde verschiedenster Art verteidigen. Diese Ansicht wies in höchst erwünschter Weise den extrafloralen Nektarien, für deren Funktion man keine andere, irgendwie plausible Erklärung finden konnte, eine wichtige biologische Rolle zu. Eine Reihe von Umständen sprach sehr für diese Ansicht, das allgemeine Schutzbedürfnis der Pflanzen gegen Raupen- und Käferfraß, gegen unberufene Pollenräuber usw., die vorwiegende Funktionstüchtigkeit der extrafloralen Nektarien an den jungen Teilen der Pflanzen und nicht zum wenigsten die große Verbreitung dieser Organe in den Tropen, wo auch die Ameisen eine größere Rolle spielen als anderswo. Bau und Anordnung der extrafloralen Nektarien ist verschieden. Bei Passifloraarten bilden sie große gestielte, kopfige oder becherförmige Körper an den Blattstielen, bei Polygonum sachalinense sind es breite sezernierende Flächen an der Basis der Blattstiele, bei Prunus avium sitzen sie als rotgefärbte Schwielen zu beiden Seiten des Blattstieles, bei Ricinus stellen sie ebenfalls schwielige Körperchen an den Blattstielen und der Blattbasis dar. Auch an Blatträndern kommen sie vor, besonders auch an Nebenblättchen, wie z. B. bei Vicia sepium, wo sie als dunkler gefärbte Gruben auf ihrer Unterseite sitzen usw. Andere befinden sich am Kelch, an der Blattspreite, an den Blütenstielen. Wie gesagt, ist die Dauer der Sekretion nicht überall gleich, meist ist sie deutlich nur an jungen Teilen oder überhaupt nur in der Jugend der Pflanzen, manche sezernieren sogar überhaupt nicht. Wenn es auch Sekrete gibt, welche gänzlich von den Ameisen verschmäht werden und somit ungenutzt abfließen, besuchen doch im allgemeinen, wie durch die ausgedehnten Beobachtungen Delpinos und seiner Schule festgestellt wurde, die Ameisen in der Tat die Drüsen und lecken den Honig ab. Trotz der vielen Einzelbeobachtungen hat sich jedoch ein Schutz von seiten der Ameisen weniger überzeugend beweisen lassen, oft ist auch auf den Beweis unter Appell an die Theorie ganz verzichtet worden. Allerdings muß dabei zugegeben werden, daß ein wirklich einwandfreier Beweis nur mit großen Schwierigkeiten, in vielen Fällen wohl überhaupt nicht geführt werden kann. Nieuwenhuis von Uexküll-Güldenbandt hat das reiche Material tropischer Pflanzen mit extrafloralen Nektarien in Buitenzorg auf Java dazu benutzt, um festzustellen, ob die Pflanzen wirklich einen Schutz von seiten der ihre Zuckersäfte aufsuchenden Ameisen genießen. Sie kommt zu einem negativen Ergebnis. Bienen, Hummeln und Wespen lassen sich durch die Ameisen nicht abhalten, die Blüten anzubohren, die Nektarsäfte der entsprechenden Pflanzen erfüllen also nicht den Zweck, den ihnen Burck zuschreiben wollte. Andererseits erwies sich auch die Blütendurchbohrung als gleichgültig für den Fruchtansatz. Raupen, Käfer, Wanzen, Larven verschiedener Art werden durch die Ameisen nicht vertrieben, ja gehen sogar gelegentlich aggressiv gegen die letzteren vor. Oftmals saugen andere Insekten einträchtig mit den Ameisen

den Honig aus demselben Nektarium. Demgemäß ließ sich nicht feststellen, daß die Pflanzen mit Nektarien weniger von Schädlingen zu leiden hatten wie andere. Ja in sehr vielen Fällen wurde der Ameisenbesuch für sie insofern verhängnisvoll, als die Ameisen ebenso wie es oben schon für andere Pflanzen erwähnt wurde, ausgedehnte Läusezuchten auf ihren Wirten anlegten, oder aber es konnte auch beobachtet werden, daß die Ameisen selbst die Nektarien abfraßen sowie die Blätter durch Fraß beschädigten. Außerdem fand sich eine Anzahl schädlicher Insekten auf den Pflanzen ein, welche direkt durch den Nektar angelockt wurden. v. Wettstein dagegen konnte bei Centaurea alpina, Jurinea mollis u. a. wirklich einen von den Ameisen gewährten Schutz konstatieren. Diese in Mitteleuropa heimischen Kompositen scheiden an den Hüllblättern der Köpfchen Honig aus, der von Ameisen abgeholt wird. v. Wettstein stellte nun fest, daß solche Blütenköpfe, welche künstlich für Ameisen unzugänglich gemacht wurden, erheblich stärker unter Käferfraß zu leiden hatten als die, welche sich des normalen Ameisenbesuches erfreuten.

6. Theoretische Erörterung der mitgeteilten Fälle von Myrmecophilie. Die Entscheidung darüber, ob die vorstehend mitgeteilten Tatsachen im Sinne der alten orthodoxen Myrmecophilie zu deuten sind oder nicht, hängt von folgenden Voraussetzungen ab: 1. muß den Pflanzen aus ihrer Ameisenbevölkerung ein nachweisbarer Nutzen erwachsen und die Ameisen müssen dementsprechend auch geeignet sein, Nutzen zu gewähren; 2. müssen sich Einrichtungen an der Pflanze finden, welche sich nur als Anpassungen an den Ameisenbesuch deuten lassen. Was den ersten Punkt angeht, so ist ein Nutzen der Ameisen bisher nur in wenigen Fällen wahrscheinlich gemacht. Die meisten Pflanzenameisen sind auch gar keine geeigneten Schutzsoldaten, da sie keine Fleischfresser sind. Insbesondere gilt dies für die harmlosen Formen, welche die Nektarsäfte auflecken. Daß Fleischfresser durch Ungeziefervertilgung der Pflanzenwelt einen bedeutenden Dienst leisten können, ist dagegen nicht zu bestreiten. So werden seit alters in China raubgierige, fleischfressende Ameisen gesammelt und in den Orangen- und Mandarinengärten angesiedelt. Auch in Java verfährt man (z. B. in Tjilintjing bei Batavia) nach demselben Rezept. Man sammelt die Nester einer sehr bösartigen Ameisenart und hängt sie in die Mangobäume, verbindet diese, um den Ameisen den Verkehr zu erleichtern mit Bambusstangen und hängt außerdem Leguankadaver als Futter auf. Die also gehegte Ameisenbevölkerung säubert den Obstgarten von einem verderblichen, das Obst vernichtenden Rüsselkäfer. In ähnlicher Weise schützt man in Oberitalien Obstbäume, und neuerdings wird auch bei tropischen Kulturen der Versuch gemacht, gewisse Schädlinge durch Ansiedelung bestimmter Ameisen zu vernichten. Bekannt ist auch die Leistungsfähigkeit der großen Waldameise (Formica rufa) in der Vertilgung von Insekten. Nach Forel vernichtet die Bevölkerung eines großen Nestes an einem Tage 100 000 Insekten. Auch die Bissigkeit der Pflanzenameisen ist stark übertrieben worden. Mit Ausnahme der auf Acacia spadicigera und Barteria fistulosa vorkommenden Arten, welche als gefährlich bezeichnet werden, sind die übrigen Pflanzenameisen nicht besonders wehrhaft. Was dann die zweite Voraussetzung anbetrifft, so hat sie sich noch weniger beweisen lassen. Hohlräume sind ja ganz allgemein verbreitet bei Pflanzen. Die hohlen Internodien, Stacheln usw. finden also in den mechanischen Bauprinzipien der betreffenden Pflanzen ihre meist völlig ausreichende Erklärung. Die präformierten Durchbruchsstellen lassen auch eine andere Erklärung zu, die Hohlräume der Myrmecodien stehen zur Wasseraufnahme in Beziehung, desgleichen die Blattschläuche der Dischidia. Nur die Blattsäckchen müssen vorläufig noch als ganz unbekannte Organe gelten, woraus natürlich nicht ihre Bedeutung für die Ameisen abzuleiten wäre. Das gleiche muß über die Ameisenbrötchen, die Perldrüsen und die extrafloralen Nektarien gesagt werden. Da sie vorwiegend nur an jungen Teilen der Pflanze fungieren, also vielfach typische Jugendorgane sind, so spielen sie wahrscheinlich eine Rolle bei den physiologischen Funktionen der betreffenden Teile, wenn auch vorläufig nicht bekannt ist, welche. Bei den Nektarien kann man wohl nicht ohne Grund vermuten, daß sie bei dem Wassertransport in junge Teile, vornehmlich in die Blätter, wirksam sind, doch ist noch kein Beweismaterial hierfür beigebracht worden. Wir müssen in den meisten Fällen annehmen, daß sich die Ameisen die obigen verschiedenartigen Einrichtungen einfach zunutze machen, daß also hier eine ähnlich einseitige Ausbeutung von seiten überlegener Intelligenz stattfindet, wie sie auch in dem Verhältnis des Menschen zur Pflanzenwelt hervortritt, und daß bei der Theorie der Ameisenpflanzen gewisse wegen ihrer Merkwürdigkeit auffallende Erscheinungen aus der Fülle der in der Organismenwelt herrschenden Wechselbeziehungen herausgehoben und in eine einseitige Beleuchtung gerückt worden sind. Solche Beziehungen sind natürlich wirklich vorhanden, doch sind sie abgeleiteter, nicht ursprünglicher Art. Sicher also genießen viele Pflanzen auch einen

gewissen Schutz, wenn sich Ameisen an sie gewöhnen. Bei Myrmecodia deponieren die Ameisen ihre Exkremente in bestimmten Höhlenpartieen des Labyrinthes und eröffnen damit dem Epiphyten eine zweifellos sehr wichtige Nährstoffquelle; bei gewissen epiphytischen Farnen könnte es ähnlich sein, da Ridley behauptet, daß z. B. Platycerium ohne Ameisen schlechter gedeihe, doch ist dies nur eine Vermutung. Ferner leisten die Ameisen vielen Epiphyten dadurch einen wesentlichen Dienst, daß sie Erde und allerlei organisches Material auf die Baumäste schaffen und so zur Vermehrung der epiphytischen Substrate beitragen. So ist u. a. die Beobachtung Ridleys zu erwähnen, nach der Ameisen an den Wurzeln der epiphytischen Orchidee Dendrobium crumenatum Erde ansammeln. Solchen Beispielen des Nutzens, stehen jedoch auch andere gegenüber, aus denen sich ein zweifelloser Nachteil für die Pflanze ergibt. Spechte hacken die Cecropien und die Humboldtien an, um die Ameisen darin zu verzehren, die Ameisen selber benagen sehr häufig ihre eigenen Wirte und fügen ihnen Schaden zu; vor allem aber ist in sehr vielen Fällen festgestellt, daß die Ameisen einen der ärgsten Feinde der Pflanzenwelt, die Blatt- und Schildläuse auf den Ameisenpflanzen ansiedeln, hegen und beschützen.

7. Die Bedeutung der Ameisen für die Ausbreitung der Pflanzen. Ganz anderer Natur ist die Bedeutung, welche Ameisen bei der Verbreitung von Pflanzen spielen Sernander hat nämlich bewiesen, daß eine große Zahl von Pflanzen ihre eigenartige Verbreitung den Ameisen verdanken. Er bezeichnet diese Gewächse als Myrmecochoren. Bei ihnen hat sich auch die Existenz von Einrichtungen zeigen lassen, die zwar in ihrer ursprünglichen Anlage wahrscheinlich anderen Zwecken dienten, aber unter der selektiven Einwirkung der Ameisen vervollkommnet und zuletzt ausschließlich zu dem neuen Zwecke umgebildet wurden. Viele Pflanzen besitzen nämlich ölhaltige Gewebe oder Körperchen verschiedenster Struktur und morphologischer Dignität an ihren Samen, Früchten oder Blütenständen, kurz an den „Vermehrungseinheiten". Die Ameisen sammeln nun solche Vermehrungseinheiten, um die ölhaltigen Teile, die Elaiosomen, zu verzehren und schleppen sie nach ihren Nestern. Indem sie nun aus verschiedenen Gründen einige unterwegs liegen lassen und auch später den angesammelten Vorrat, nachdem sie die Elaiosomen abgefressen haben, wieder aus ihren Nestern herauswerfen, werden die Samen verbreitet und zwar synzoisch, nach der Bezeichnungsweise Sernanders, d. h. absichtlich transportiert durch Tiere. Auf experimentellem Wege wurde eine große Zahl von Myrmecochoren ermittelt, indem eine bestimmte Zahl der zu prüfenden Samen, Früchte usw. auf Ameisenstraßen gelegt und dann gezählt wurde, wie viel nach einer angemessenen Zeit verschwunden waren. Auch wurde festgestellt, daß wirklich die ölhaltigen Teile das Anlockungsmittel darstellten. Bedenkt man, daß von Formica rufa z. B. über 36 000 Samen während einer Vegetationsperiode, d. h. in etwa 80 Tagen, transportiert werden und die Entfernung von der Mutterpflanze bis 70 m betragen kann, so ergibt sich daraus die große Wirksamkeit dieses Verbreitungsmittels. Außer gewissen Ruderalpflanzen sind es vorwiegend Pflanzen des schattigen Waldbodens, welche myrmecochor sind. Während die hohen Waldbäume ihre flugfähigen Samen und Früchte dem Winde übergeben, die Beeren der Sträucher in der zweiten Etage von den Vögeln gefressen und so verbreitet werden, lassen die Bodenpflanzen ihre mit Elaiosomen ausgerüsteten Vermehrungsorgane durch die Ameisen verschleppen. Besonders im Buchenwald, auch im Eichenmischwald, weniger in Birken- und Nadelholzwäldern sind die Myrmecochoren verbreitet; so gibt Sernander z. B. für den Buchenwald u. a. folgende Pflanzen an, die typische Myrmecochoren sind: Ajuga reptans, Allium ursinum, Arenaria trinervia, Carex digitata, Ficaria ranunculoides, Gagea lutea, Galanthus nivalis, Galeobdolon luteum, Helleborus viridis, Hepatica triloba, Lamium maculatum, Lathraea squamaria, Luzula pilosa, Melampyrum nemorosum, Melica nutans, Mercurialis perennis, Pulmonaria officinalis, Symphytum tuberosum, Viola odorata. Außerdem sei noch Chelidonium majus genannt, das auch deswegen von Interesse ist, als es sich mit Viola odorata in Palermo auf der Dattel epiphytisch ansiedelte und neben Corydalis ochroleuca, Scrophularia vernalis, Helleborus foetidus häufig auf Mauern angetroffen wird. In beiden Fällen sind Ameisen als die Transporteure anzunehmen. Da das Körnersammeln auch in den übrigen Teilen der Erde eine bei Ameisen häufig angetroffene Eigentümlichkeit ist, sind die Myrmecochoren wahrscheinlich sehr weit verbreitet. So kann man z. B. vermuten, daß die Ameisen (Messor barbarus), welche Escherich in Erythrea beobachtete, in der Verbreitungsbiologie der dortigen Flora eine Rolle spielen. Z. B. verschleppen sie die Knollen von Cyperus bulbosus, der in Abesinien verbreitet ist.

Sehr merkwürdig sind die Ameisengärten, von denen Ule aus Brasilien berichtet. Gewisse Ameisen schleppen nämlich bedeutende Erdmassen auf Bäume und legen darin ihre Nester an. Man trifft nun auf diesen regelmäßig ganz bestimmte Pflanzen an, wie z. B. Philodendron myrmecophilum, Nidularium myrmecophilum, Codonanthe formicarum usw. Sie werden von den Ameisen auf den atmosphärischen Gärten angesiedelt, wahrscheinlich als Schutz gegen die Sonne und den Regen. Die meisten der in den Ameisengärten regelmäßig angetroffenen Arten sind sogar gänzlich auf diese Standorte beschränkt, verdanken mithin ihre Erhaltung ebenso den Ameisen, wie gewisse Kulturpflanzen sie dem Menschen verdanken. Ob sie den Ameisen auch Nahrung gewähren, ist nicht bekannt, desgleichen läßt es sich schwer entscheiden, ob diese Ameisenpflanzen Ueberreste vorzeitlicher Vegetationen sind, die von den Ameisen aus gewissen Gründen vor dem Aussterben gerettet wurden, oder ob es neue Züchtungen sind, welche die Ameisen entweder absichtslos oder absichtlich, aber wohl nur instinktiv ausgelesen haben.

Literatur. ***O. Beccari,*** *Malesia, Bd. 2, Genova Firenze 1877 bis 1889.* — ***Th. Belt,*** *The naturalist in Nicaragua, London 1874.* — ***F. Delpino,*** *Funzione mirmecofila nel regno vegetale Mem. d. Acad. d. Scienze d. Istituto d. Bologna, Bd. VII, VIII, X, 1886 bis 1889.* — ***K. Escherich,*** *Zwei Beitr. z. Kapitel Ameisen und Pflanzen, Biol. Zentralbl., Bd. 31, 1911, Ameisen und Pflanzen. Thar. forstl. Jahrb., Bd. 60, 1909.* — ***K. Fiebrig,*** *Cecropia peltata u. ihr Verhältn. z. Azteca, Alfari etc., Biol. Zentralbl., Bd. 29, 1909.* — ***H. v. Jhering,*** *Die Cecropien u. ihre Schutzameisen, Bot. Jahrb. f. System. usw., Bd. 39, 1907.* — ***Kerner v. Marilaun,*** *Pflanzenleben Leipzig 1896 bis 1898.* — ***H. Kohl,*** *Die Ameisenpfl. d. trop. Afrika usw., Natur u. Offenbarung, Bd. 55, 1909.* — ***H. Miehe,*** *Javanische Studien, II. Untersuchg. ü. d. javan. Myrmecodia, Abh. d. Kgl. Sächs. Ges. d. Wissensch. Math. phys. Klasse, Bd. 32, Nr. IV, 1911.* — ***A. Moeller,*** *Die Pilzgärten einig. südamerik. Ameisen, Bot. Mitt. a. d. Tropen, Heft 6, Jena 1893.* — ***F. Müller,*** *Die Imbauba u. ihre Beschützer Kosmos, Bd. VIII, 1880 bis 1881.* — ***Derselbe,*** *Z. Frage d. myrmekoph. Pflanzen, Monatl. Mitt. a. d. Gesamtgeb. d. Naturwissensch. Bd. 5, 1888.* — ***Nieuwenhuis von Üxküll M. Güldenbandt,*** *Extraflorale Zuckerausscheidungen u. Ameisenschutz, Annal. d. jard. bot. d. Buitenzorg, Bd. 21, 1907.* — ***M. Raciborski,*** *Ueber myrmekophile Pflanzen, Flora Bd. 8, 1900.* — ***E. Rettig,*** *Ameisenpflanzen-Pflanzenameisen, Beih. z. Botan. Zentralbl., Bd. 17, 1904.* — ***H. N. Ridley,*** *Symbiosis of ants and plants Ann. of Botany, Bd. 24, 1910.* — ***A. F. W. Schimper,*** *Die Wechselbeziehg. zw. Pfl. u. Ameisen i. trop. Amerika, Botan. Mitt. a. d. Tropen, Heft 1, 1888.* — ***Derselbe,*** *Pflanzengeographie, 2. Aufl., Jena 1908.* — ***K. Schumann,*** *Einige neue Ameisenpflanzen, Jahrb. f. wiss. Botan., Bd. 19, 1888.* — ***Derselbe,*** *Ueber afrikan. Ameisenpflanzen, Ber. d. Deutsch. Botan. Gesellsch., Bd. 9, 1891.* — ***E. Schwendt,*** *Z. Kenntnis d. extraflor. Nektarien, Beih. z. Botan. Zentralbl., 1. Abhdl., Bd. 22, 1907.* — ***R. Sernander,*** *Entwurf einer Monogr. d. europ. Myrmekochoren Kunnigl. Swenska Vetensk., Akad. Handl. Bd. 41, Nr. 7, 1906.* — ***Y. Sjöstedt,*** *Akaziengallen u. Ameisen a. d. ostafrikan. Steppen, Wissensch. Ergebn. Schwed. Zool. Kilimandjaro-Exped., Upsala 1908.* — ***M. Treub,*** *Sur la Myrmecodia echinata Gaudich. Annal. d. jard. botan. d. Buitenzorg Bd. 3, 1882.* — ***Derselbe,*** *Nouv. rech. s. la Myrm. de Java. Ebenda Bd. 7, 1888.* — ***E. Ule,*** *Ameisenpflanzen, Bot. Jahrb. f. System., Bd. 37, 1906.* — ***Derselbe,*** *Ameisengärten i. Amazonasgebiet. Ebenda Bd. 30, Beibl. Nr. 68.* — ***R. v. Wettstein,*** *Ueber Kompos. d. österr.-ungar. Flora m. zuckerabscheid. Hüllschuppen. Sitzungsber. d. K. Ak. d. Wiss. Math.-naturw. Kl., Bd. 97, 1. Abtlg., 1889.*

H. Miehe.

Amici
Giambattista.

Astronom, Physiker und Botaniker. Er wurde am 25. März 1786 in Modena geboren, studierte dort und in Bologna Mathematik und Physik und wurde bald darauf in seiner Vaterstadt Professor der Mathematik. 1831 siedelte er infolge politischer Umstände nach Florenz über, wo er — nominell Professor der Astronomie in Pisa — die Sternwarte des Museums der Naturwissenschaften dirigierte. Dort starb er am 10. April 1863. Amici ist vor allem durch die Erfindung und Konstruktion einer größeren Zahl optischer Instrumente berühmt geworden, unter denen sein katadioptisches, später vielfach von ihm verbessertes Mikroskop, sein Spiegel-(Reflexions-)Teleskop (1812), ein Mikrometer mit zweigeteilter Linse, sein Polarisationsapparat, seine Vorrichtung zur Messung der Lichtstärke eines astronomischen Objektes durch Doppelbilder und ein 1827 erfundenes mikroskopisches Immersionsobjektiv unter vielen anderen zu nennen sind. Mit diesen Instrumenten hat er zahlreiche bemerkenswerte astronomische und wichtige botanische Beobachtungen gemacht. Unter den letzteren seien die über Plasmaströmung in Characeen, die Spaltöffnungen und ihre Funktion, den Luftgehalt der Intercellularen, die Pollenschläuche, die Befruchtung beim Kürbis und bei den Orchideen als die bedeutendsten genannt.

Literatur. ***H. v. Mohl*** *in Bot. Ztg. 21 1868 (Beilage zu Nr. 34 S. 1 bis 8).*

A. Ruhland.

Amikronen

heißen die mit Hilfe des Ultramikroskops nicht mehr erkennbaren kleinsten Partikelchen in Suspensionen, Emulsionen oder dgl. Vgl. den Artikel „Disperse Gebilde“.

Amine und Amide

sind Körper, welche den einwertigen Ammoniakrest $—NH_2$ (Amino-, Amidogruppe) enthalten; sie werden im Artikel „Ammoniakderivate" besprochen.

Ammoniak

NH_3 wird unter Stickstoff im Artikel „Stickstoffgruppe" behandelt.

Ammoniakderivate.

1. Begriff und Einteilung. 2. Anorganische Ammoniakderivate. 3. Organische Ammoniakderivate: a) Eigentliche Ammoniakderivate: α) Amine und Ammoniumbasen; β) Säureamide; γ) Iminbasen; δ) Säureimide, Laktame, Iminoäther, Imidchloride und Amidine; ε) Nitrile und Isonitrile; η) Ringförmige Ammoniakderivate. b) Derivate des Hydroxylamins: α) Hydroxylaminbasen; β) Hydroxamsäuren; γ) Oxime; δ) gemischte Hydroxylaminderivate. c) Derivate des Hydrazins: α) Alkylhydrazine; β) Säurehydrazide; γ) Hydrazone, Azine und Osazone; δ) gemischte Hydrazinderivate. 4. Beschreibung wichtiger Ammoniakderivate.

1. Begriff und Einteilung. Unter dem Begriff Ammoniakderivate versteht man zunächst alle chemischen Verbindungen, welche sich vom Ammoniak dadurch ableiten lassen, daß man in dessen Formel $N\begin{cases}H\\H\\H\end{cases}$ eines oder mehrere Wasserstoffatome durch andere Elemente oder durch Gruppen von Elementen (sogenannte Radikale) ersetzt denkt. Hat an diesem Ersatz eine kohlenstoffhaltige Gruppe teilgenommen, so liegt ein organisches Ammoniakderivat, in jedem anderen Falle ein anorganisches Ammoniakderivat vor. Da die letztgenannten Verbindungen in dem Artikel „Stickstoff" ausführlich behandelt werden, soll hier im wesentlichen nur von den organischen Ammoniakderivaten die Rede sein. Charakteristisch für das Ammoniak ist die Fähigkeit, unter Umwandlung des dreiwertigen Stickstoffs in ein fünfwertiges Stickstoffatom durch Addition eines Moleküls Wasser, eine Base, das Ammoniumhydroxyd, oder durch Addition eines Moleküls einer einbasischen Säure Salze dieser Base, die Ammoniumsalze, zu bilden

$$NH_3 + H_2O = NH_4OH \longleftarrow$$
$$NH_3 + HCl = NH_4Cl \longleftarrow$$

Da diese Fähigkeit sich auch bei manchen organischen Ammoniakderivaten wiederfindet, so werden die mit den eigentlichen Ammoniakderivaten in engstem Zusammengang stehenden organischen Ammoniumbasen und deren Salze an gleicher Stelle besprochen.

Die eben erwähnten basischen Eigenschaften des Ammoniaks bleiben in den Ammoniakderivaten — wenn auch stufenweise verstärkt oder abgeschwächt — im allgemeinen erhalten, wenn ein Ersatz von Wasserstoffatomen im Ammoniak (oder Ammoniumhydroxyd) lediglich durch Alkylgruppen[1]) (Alkohol- beziehungsweise Kohlenwasserstoffreste) stattgefunden hat. Derartige Verbindungen bezeichnet man daher als Aminbasen (Amine, Alkylamine)[2]) oder auch einfach als organische Basen. Dagegen verschwindet der basische Charakter des Ammoniaks, das heißt die Neigung des dreiwertigen Stickstoffatoms, in fünfwertigen Stickstoff überzugehen, mehr oder weniger vollständig, wenn eines oder mehrere seiner Wasserstoffatome durch Acyl- oder Acidylgruppen[3]) (organische Säurereste) ersetzt werden. Derartige Ammoniakderivate sind im allgemeinen keine ausgesprochenen Basen mehr; sie werden als Säureamide oder auch kurzweg als Amide bezeichnet.

Sowohl bei den Aminbasen als auch bei den Amiden können die eingetretenen Gruppen aliphatisch (das heißt aus offenen Kohlenstoffketten bestehend) oder aromatisch (das heißt Kohlenstoffringe enthaltend) sein und man unterscheidet dementsprechend aliphatische und aromatische Amine und Amide.

Ist in einem und demselben Ammoniakmolekül ein Wasserstoff durch einen Alkylrest, ein anderes aber durch eine Acidylgruppe ersetzt, so spricht man von Alkylsäureamiden oder von substituierten Säureamiden. Ganz allgemein nennt man derartige Derivate auch gemischte Verbindungen. Ebenso nennt man aber auch Aminbasen, welche gleichzeitig aliphatische und aromatische Alkylreste enthalten, gemischte Amine.

Entsprechend der Definition der zweiwertigen NH-Gruppe als Imino- oder Imidogruppe bezeichnet man die Dialkylamine, welche ja diese Gruppe enthalten, wohl auch als Imid- oder Iminbasen, doch wird unter diesem Namen häufig eine besondere Abart solcher Verbindungen verstanden.

Sind nämlich zwei Wasserstoffatome eines und desselben Ammoniakmoleküls nicht durch zwei getrennte einwertige organische Gruppen,

---

[1]) Im vorliegenden Artikel werden aliphatische Kohlenwasserstoffreste als Alphyl-, aromatische als Aryl-Gruppen bezeichnet, während die Bezeichnung Alkyl- alle möglichen Arten zusammenfaßt. Abkürzungen: Alph-, Ar- und Alk-.

[2]) Nicht wie früher geschrieben wurde Amide oder Amidbasen.

[3]) Abzürzung Ac—.

sondern durch eine zweiwertige Gruppe ersetzt, das heißt ist ein organischer Komplex mit zwei Affinitäten — gleichgültig, ob dieselben dem gleichen oder zwei verschiedenen Kohlenstoffatomen angehören — an den gleichen Ammoniakrest =NH gekettet, so bezeichnet man die betreffende Verbindung im besonderen als Imidoverbindung und zwar je nach der Natur der am Stickstoff haftenden Gruppe entsprechend dem vorher Gesagten entweder als Imidbase oder als Säureimid. Hat die doppelt am Stickstoff haftende Gruppe einerseits den Charakter einer Alkylgruppe, andererseits den eines Säurerestes, so bezeichnet man die Verbindung wegen ihrer Aehnlichkeit mit den Laktonen als Laktam.

Die durch Ersatz aller drei Wasserstoffatome des Ammoniaks durch Alkylgruppen resultierenden Verbindungen nennt man häufig Nitrilbasen, obwohl dieser Name leicht zu Verwechslungen mit den eigentlichen Nitrilen führt.

Sind alle drei Wasserstoffatome eines Ammoniakmoleküls durch ein- und dasselbe Kohlenstoff ersetzt, das heißt: ist ein Kohlenstoffatom eines organischen Komplexes mit drei Affinitäten an den gleichen Ammoniakrest ≡N gekettet, so bezeichnet man die entstehende Verbindung als Nitril oder auch — wegen ihrer leichten Ueberführbarkeit in eine entsprechende Carbonsäure — als Säurenitril. Die Nitrile enthalten also immer die Gruppe —C≡N, die sogenannte Nitril- oder Cyangruppe und werden daher auch unter Umständen als Cyanide bezeichnet. Verwandt mit den Nitrilen sind die sogenannten Isonitrile, welche die Gruppe —N=C enthalten, in denen also zwei Wertigkeiten eines Stickstoffatoms durch die beiden Wertigkeiten eines zweiwertigen Kohlenstoffatoms abgesättigt sind.

Ringförmige Ammoniakderivate, das heißt Verbindungen, in denen ein Ammoniakrest — NH-Gruppe oder Stickstoffatom — mit Kohlenstoffatomen allein oder auch mit Kohlenstoffatomen und andersartigen Elementaratomen ringförmige Komplexe bildet, werden — soweit sie nicht, wie die vorher erwähnten Imidoverbindungen in engstem Zusammenhang mit offenen Ammoniakderivaten stehen — in dem Artikel „Heterozyklische Verbindungen" behandelt.

Denkt man sich im Ammoniak ein Wasserstoffatom durch eine Hydroxylgruppe ersetzt, so erhält man das Hydroxylamin NH_2OH, eine Verbindung, die in bezug auf ihre salzbildenden Eigenschaften dem Ammoniak ähnlich ist. Das Hydroxylamin selbst gehört zu den anorganischen Ammoniakderivaten und wird daher in dem Artikel „Stickstoff" ausführlicher behandelt, doch lassen sich wie beim Ammoniak auch beim Hydroxylamin die Wasserstoffatome durch kohlenstoffhaltige Gruppen ersetzen. Von den so entstehenden organischen Hydroxylaminderivaten wird hier die Rede sein.

Die Konstitution des Hydroxylamins bedingt im Gegensatz zu der des Ammoniaks die Möglichkeit zweier verschiedener Arten von Hydroxylaminderivaten, denn es ist nicht gleichgültig, ob die betreffende organische Gruppe für eines der beiden direkt am Stickstoff haftenden Wasserstoffatome oder für das Wasserstoffatom der Hydroxylgruppe eingetreten ist. Letztere Derivate vom Schema NH_2OX bezeichnet man als α-, erstere vom Schema XNHOH als β-Verbindungen.

Durch Eintritt von Alkylgruppen erhält man die basischen α- und β-Alkylhydroxylamine. Von den entsprechenden Acidylderivaten sind die in der Hydroxylgruppen des Hydroxylamins substituierten (also die α-Verbindungen) nicht bekannt und offenbar garnicht existenzfähig, aber auch die entsprechenden am Stickstoff substituierten β-Acidylhydroxylamine scheinen nicht in der den Säureamiden entsprechenden Form X.CO.NHOH zu existieren, sondern haben offenbar die tautomere Form X.C(OH):NOH, da sie zum Teil ausgesprochenen Säurecharakter besitzen. Sie führen den Namen Hydroxamsäuren und entsprechen in ihrer Konstitution den Imidoverbindungen, können also als Oximido- oder Isonitrosoverbindungen aufgefaßt werden.

Mit besonderer Leichtigkeit können Oximido- oder Isonitrosoverbindungen erhalten werden, in denen die Oximido- oder Isonitrosogruppe mit einer zweiwertigen Alkylidengruppe verbunden ist. Solche Verbindungen entsprechen dem Schema

$$\begin{matrix} X \\ Y \end{matrix}\!\!>\!C=NOH.$$

Sie werden als Oxime, und zwar je nach ihrer Herkunft von Aldehyden oder Ketonen als Aldoxime oder Ketoxime bezeichnet.

Auch gemischte Verbindungen verschiedener Art sind bekannt; darunter solche, die gleichzeitig Derivate des Ammoniaks und des Hydroxylamins sind, die sogenannten Amidoxime oder Oxamidine vom Schema

$$X.C\!\!<\!\!\begin{matrix} NH_2 \\ NOH. \end{matrix}$$

Denkt man sich im Ammoniak ein Wasserstoffatom durch einen anderen einwertigen Ammoniakrest, eine sogenannte Aminogruppe vertreten, so erhält man das Hydrazin $H_2N—NH_2$, das man auch durch Zusammentritt zweier Aminogruppen entstanden denken kann und dementsprechend als Diamin bezeichnet. Dasselbe ist wie das Ammoniak eine Base. Das Hydrazin gehört zu den anorganischen Ammoniak-

derivaten und wird daher im Artikel „Stickstoff" behandelt, liefert aber wiederum organische Derivate. Da es vier vertretbare Wasserstoffatome besitzt, können eine bis vier organische einwertige Gruppen in das Hydrazin eintreten.

Sind zwei Wasserstoffatome des Hydrazins durch organische Reste ersetzt, so ist es nicht gleichgültig, ob dies an dem gleichen oder an den beiden Stickstoffatomen geschehen ist. Man hat also zu unterscheiden zwischen Derivaten von der Form XHN—NHX, den sogenannten symmetrischen, und Derivaten von der Form $X_2N—NH_2$, den sogenannten asymmetrischen Hydrazinverbindungen. Auch bei Ersatz von drei oder vier Wasserstoffatomen des Hydrazins durch organische Gruppen, die untereinander verschieden sind, treten entsprechende Isomerieen auf.

Je nach der Natur der eintretenden organischen Gruppen leiten sich hier, wie beim Ammoniak, basische Alkylhydrazine und neutrale Acidylhydrazine, die gewöhnlich als Säurehydrazide bezeichnet werden, ab.

Aehnlich wie beim Hydroxylamin lassen sich auch beim Hydrazin mit besonderer Leichtigkeit Derivate vom Schema

$$\genfrac{}{}{0pt}{}{X}{Y}{>}C-N-NH_2$$

gewinnen, in denen zwei Wasserstoffe der einen NH_2-Gruppe gemeinsam durch dieselbe zweiwertige Alkylidengruppe ersetzt worden sind, die sogenannten Hydrazone, die sich, ebenso wie die vorerwähnten Oxime, praktisch von Aldehyden oder Ketonen ableiten. Natürlich können die beiden Wasserstoffatome der noch intakten NH_2-Gruppe der Hydrazone ihrerseits auch wieder durch Alkyl- oder Acidylgruppen ersetzt werden. Außerdem kann aber auch der Ersatz zweier am gleichen Stickstoffatom stehenden Wasserstoffatome durch eine zweiwertige Alkylidengruppe im gleichen Hydrazinmolekül zweimal vor sich gehen. Die entstehenden Verbindungen vom Schema $\genfrac{}{}{0pt}{}{X}{Y}{>}C-N-N=C{<}\genfrac{}{}{0pt}{}{U}{Z}$ werden als Azine bezeichnet, und zwar wiederum je nach ihrer Herkunft als Aldazine oder Ketazine.

Unter den gemischten Verbindungen ist von einiger Wichtigkeit namentlich eine sich von der Kohlensäure herleitende Verbindung, die gleichzeitig Ammoniak- und Hydrazinderivat ist, das Semicarbazid von der Formel

$$OC{<}\genfrac{}{}{0pt}{}{NH_2}{NH.NH_2}$$

Werden in diesem die beiden Wasserstoffatome der zum Hydrazinrest gehörigen NH_2-Gruppe durch eine zweiwertige Alkylidengruppe ersetzt, so bezeichnet man die entstehende Verbindung

$$OC{<}\genfrac{}{}{0pt}{}{NH_2}{NH.N{=}C{<}\genfrac{}{}{0pt}{}{X}{Y}}$$

als ein Semicarbazon.

Von anderen verwandten Verbindungen, die sich als Ammoniakderivate betrachten lassen, sind von größerer Wichtigkeit nur noch die sich von den Dialkylaminbasen ableitenden sogenannten Nitrosamine von der Formel $\genfrac{}{}{0pt}{}{X}{Y}{>}N-NO$, und die Derivate der sogenannten Stickstoffwasserstoffsäure $HN{<}\genfrac{}{}{0pt}{}{N}{N}{\|}$ (vgl. den Artikel „Stickstoff"). Diese Derivate führen verschiedene Bezeichnungen. Ist das Wasserstoffatom der Stickstoffwasserstoffsäure durch eine organische Acidylgruppe ersetzt, so bezeichnet man die Verbindung als das Azid der betreffenden organischen Säure. Steht an Stelle desselben Wasserstoffatoms eine aliphatische Alkylgruppe, so spricht man entweder auch von einem Azid oder man benennt die Verbindung als Ester der Stickstoffwasserstoffsäure. Die aromatischen Azide schließlich bezeichnet man meist als Diazoimide.

Die Azide oder Diazoimide stehen in enger Verbindung mit der großen und wichtigen Klasse der Azo- und Diazoverbindungen, die ja ebenfalls in letzter Linie als Ammoniakderivate aufgefaßt werden können, die aber, wie alle Verbindungen, welche zwei doppelt miteinander verbundene Stickstoffatome .N = N. enthalten, in einem besonderen Artikel „Azokörper" behandelt werden. Dort wird daher auch von den Derivaten der Stickstoffwasserstoffsäure ausführlicher die Rede sein.

2. Anorganische Ammoniakderivate. Wie schon erwähnt, werden die anorganischen Ammoniakderivate in dem Artikel „Stickstoff" ausführlicher besprochen. Hier soll von ihnen daher nur insoweit die Rede sein, als sie für die organischen Derivate von Interesse sind.

Man kennt sowohl Metall- als auch Metalloidderivate des Ammoniaks. Denkt man sich im Ammoniak ein oder zwei Wasserstoffatome durch Metall ersetzt, so kommt man zu den wenig untersuchten und wenig wichtigen Metallamiden und Metallimiden, die auch nur von vereinzelten Metallen bekannt sind. Wichtiger sind die durch Ersatz aller drei Wasserstoffe entstehenden Metallnitride, die man von sehr zahlreichen Metallen kennt. Sie entstehen zum Teil (Li_3N, Mg_3N_2, Ca_3N_2, Sr_3N_2, Ba_3N_2, Mn_4N_2 und CrN) durch direkte Vereinigung von Metall und Stickstoff bei höherer Temperatur, zum Teil durch Glühen von Metallen oder Metalloxyden im Ammoniakstrom und schließlich durch doppelte Umsetzung von Metallchloriden mit anderen Metallnitriden. Es sind kristallinische oder amorphe Pulver, die sich den Metallcarbiden ziemlich analog verhalten.

Von den Halogenstickstoffverbindungen, die aus Ammoniumsalzen mit freiem Halogen entstehen, sei hier nur erwähnt, daß sie äußerst explosive Substanzen sind. Der Chlorstickstoff NCl_3 sowie das kürzlich bekannt gewordene Monochloramin NH_2Cl sind gelbe Oele. Eine entsprechende Bromverbindung ist nicht mit Sicherheit bekannt und der Jodstickstoff, dessen Zusammensetzung nicht sicher fest-

steht und der vielleicht ein wechselndes Gemenge verschiedener Substanzen darstellt, bildet ein dunkelbraunes Pulver.

Das Ammoniak selbst bildet ein leicht verdichtbares Gas, das verflüssigt bei — 38,5° siedet. Es löst sich leicht im Wasser und die wässerige Lösung enthält Ammoniumhydroxyd NH_4OH, das eine schwache Base darstellt, sich aber nicht isolieren läßt, sondern hierbei wieder in NH_3 und H_2O zerfällt. Auch in trocknem Zustande verhält es sich insofern als einsäurige Base, als es ein Molekül einer einwertigen Säure addiert und so dieselben Ammoniumsalze bildet, die auch aus Ammoniumhydroxyd mit der betreffenden Säure in wässeriger Lösung entstehen

$$NH_3 + HCl = (Cl)NH_4$$

Infolge der Unbeständigkeit des Ammoniumhydroxyds entsteht aus den Ammoniumsalzen mit anderen Basen freies Ammoniak.

Hydroxylamin NH_2OH, das in Form seiner Salze technisch durch Reduktion von Nitraten oder Nitriten gewonnen werden kann, verhält sich bezüglich der Salzbildung ebenso wie Ammoniak, das heißt es addiert ein Molekül einer einwertigen Säure, indem der Stickstoff fünfwertig wird

$$N(H)(H)(OH) + NO_3H = (H)(NO_2O)N(H)(H)(OH)$$

Mit Alkalien liefern die Salze wieder freies Hydroxylamin zurück, indem eine Hydroxylammoniumhydroxydbase auch hier nicht beständig ist. Das freie Hydroxylamin bildet eine feste zerfließliche blättrige Masse, die bei 33° schmilzt und im Vakuum (unter 22 mm Druck) bei 56 bis 57° siedet.

Ein anorganisches Derivat des Hydroxylamins ist in letzter Zeit in der organischen Chemie mehrfach verwendet worden. Es ist die von Angeli untersuchte Nitrohydroxylaminsäure, für die man eine der folgenden Formeln anzunehmen hat

$$O = N(OH) = N(OH) \quad \text{oder} \quad \overset{O}{N(OH) — N(OH)} \quad \text{oder} \quad O_2N — N\begin{matrix}H\\OH\end{matrix}$$

Die nicht in freier Form, sondern nur in Salzen bekannte Verbindung entsteht aus Salpetersäureestern und alkoholischer Hydroxylaminlösung. Gewöhnlich verwendet man das mit Hilfe von Aethylnitrat dargestelle Natriumsalz, das leicht in Natriumnitrit und Nitroxyl (HNO) zerfällt und daher wie freies „Nitroxyl" reagiert.

Das Hydrazin $H_2N—NH_2$, das aus Bisdiazoessigsäure (vgl. den Artikel „Azokörper") mit Schwefelsäure oder aus Aminoguanidin (S. 308) mit Natronlauge dargestellt wird, verhält sich bei der Salzbildung ebenfalls wie Ammoniak, kann aber entsprechend dem Vorhandensein zweier Ammoniakreste zwei Moleküle einer einbasischen Säure addieren. Diese Salze sind jedoch ziemlich unbeständig und zerfallen leicht in ein Molekül Säure und das nur ein Molekül Säure enthaltende Salz. Im allgemeinen verhält sich also Hydrazin trotz des Vorhandenseins zweier dreiwertiger Stickstoffatome als einwertige Base

$$\begin{matrix}H_2N\\H_2N\end{matrix} + 2HCl \rightarrow \begin{matrix}H_2N(H)(Cl)\\H_2N(H)(Cl)\end{matrix} \rightarrow \begin{matrix}H_2N(H)(Cl)\\H_2N\end{matrix} + HCl$$

unbeständiges Dichlorhydrat → beständiges Chlorhydrat

Vom Ammoniak und Hydroxylamin unterscheidet sich das Hydrazin darin, daß seine Salze mit Kalilauge nicht freies Hydrazin, sondern eine beständige Ammoniumhydroxydbase, das Hydrazinhydrat liefern, in dem aber entsprechend der Unbeständigkeit der zweisäurigen Salze nur das eine der beiden Stickstoffatome unter Wasseraufnahme fünfwertig geworden ist

$$\begin{matrix}H_2N(H)(Cl)\\H_2N\end{matrix} + KOH = \begin{matrix}H_2N(H)(OH)\\H_2N\end{matrix} + KCl$$

Erst mit wasserabspaltenden Mitteln spaltet Hydrazinhydrat Wasser ab und liefert freies Hydrazin, das auch direkt aus seinem Salze mit Hilfe von Natriumalkoholat erhalten werden kann. Hydrazinhydrat ist eine schwächere Base als Ammoniumhydryd und Hydroxylamin. Hydrazinhydrat bildet eine rauchende Flüssigkeit, die bei 118,5° siedet und unter —40° erstarrt, freies Hydrazin eine rauchende Flüssigkeit, die bei 113,5° siedet, bei 0° erstarrt und bei + 1,4° wieder schmilzt.

Von der Stickstoffwasserstoffsäure, $HN\begin{matrix}N\\ \|\\ N\end{matrix}$ oder $HN=N\equiv N$, die aus Benzoylazoimid (vgl. den Artikel „Azokörper") mit Natriumalkoholat oder aus Natriumamid mit Stickoxydul in Form ihres Natriumsalzes gewonnen wird, sei hier nur erwähnt, daß sie eine äußerst heftig explodierende wasserhelle Flüssigkeit vom Siedepunkt 37° bildet.

3. Organische Ammoniakderivate. 3a) Eigentliche Ammoniakderivate. *α*) Amine und Ammoniumbasen. Wie schon in der Einleitung erwähnt, kann man die drei Wasserstoffatome des Ammoniaks durch Alkylgruppen (Alkoholreste oder Kohlenwasserstoffreste) ersetzen. Hierdurch wird die Basizität des Ammoniaks nicht aufgehoben. Die Alkylamine sind also Basen, die bei den niedrigeren Gliedern der aliphatischen Reihe sogar stärkere Basizität zeigen als das Ammoniak selbst und zwar wächst hier die Basizität mit der Anzahl der eintretenden Alkyle. Die aromatischen

Amine sind dagegen schwächere Basen, jedoch nur dann, wenn der aromatische Kern direkt mit dem Stickstoff verbunden ist wie im Anilin $C_6H_5.HN_2$, nicht aber, wenn zwischen beiden ein aliphatischer Rest steht, wie beim Benzylamin $C_6H_5.CH_2.NH_2$, denn derartige Verbindungen verhalten sich, wie schon hier hervorgehoben sei, bezüglich des Ammoniakrestes durchaus wie die rein aliphatischen Verbindungen. Andererseits wächst der sogenannte „acidifizierende", d. h. die Säurenatur steigernde, die Basizität aber dementsprechend schwächende Einfluß der aromatischen Gruppen natürlich mit deren Zahl. So ist das Triphenylamin $N(C_6H_5)_3$ gar keine Base mehr, und beim Diphenylamin $(C_6H_5)_2NH$ und auch beim Anilin sind die am Stickstoff stehenden Wasserstoffatome durch Kalium ersetzbar. Die Salzbildung geschieht bei den Aminen wie beim Ammoniak durch Addition eines Moleküls einer einbasischen Säure und die Salze liefern mit Alkalien wieder die freien Amine zurück, d. h. die substituierten Ammoniumhydroxyde sind mit Ausnahme der weiter unten zu besprechenden quartären Ammoniumbasen unbeständig.

Zur Isolierung oder Identifizierung der Amine werden sehr häufig die weniger löslichen Salze mit Platinchlorwasserstoffsäure $(NX_3)_2H_2PtCl_6$ oder Goldchlorwasserstoffsäure $(NX_3)HAuCl_4$ benutzt, die häufig kurz als Platin- oder Golddoppelsalze bezeichnet werden. Dem gleichen Zweck dienen auch die Salze der Pikrinsäure, die sogenannten Pikrate.

Da das Ammoniak drei vertretbare Wasserstoffatome besitzt, so unterscheidet man drei verschiedene Klassen von Aminen. Als primäre Amine bezeichnet man diejenigen Verbindungen, welche sich vom Ammoniak durch Ersatz eines Wasserstoffs ableiten, z. B.

$$\begin{matrix}H\\H\end{matrix}>N-C_2H_5$$

Aethylamin

Hier möge gleich eingeschaltet werden, daß für die aromatischen primären Amine besondere Namen gebräuchlich sind. Das Phenylamin wird meist als Anilin, das Tolylamin als Toluidin, das Xylylamin als Xylidin usw. bezeichnet.

Primäre Amine enthalten also stets die Gruppe NH_2, die sogenannte Aminogruppe und werden dementsprechend auch als Aminoverbindungen[1]) bezeichnet, indem man sie als Alkohole auffassen kann, deren Hydroxylgruppe durch die Aminogruppe ersetzt worden ist. Ebensogut kann man sie natürlich auch von den Kohlenwasserstoffen durch Ersatz eines Wasserstoffs durch die Aminogruppe abgeleitet denken

$$C_2H_5OH \rightarrow C_2H_5NH_2 \leftarrow C_2H_6$$

Aethylalkohol — Aethylamin, Amnioäthan — Aethan

[1]) Früher schrieb man weniger gut Amido anstatt Amino.

Sekundäre Amine leiten sich vom Ammoniak durch Ersatz zweier Wasserstoffatome ab, z. B.

$$H-N<\begin{matrix}C_2H_5\\C_2H_5\end{matrix} \quad \text{oder} \quad H-N<\begin{matrix}CH_3\\C_2H_5\end{matrix}$$

Diäthylamin — Methyläthylamin.

Je nachdem die beiden ersetzenden Gruppen untereinander gleich oder verschieden sind, unterscheidet man einfache und gemischte sekundäre Amine. Da die sekundären Amine stets die sogenannte Iminogruppe NH enthalten, nennt man sie wohl auch Iminbasen oder weniger gut Imidbasen.

Tertiäre Amine zeigen alle drei Wasserstoffatome des Ammoniaks durch Alkylgruppen ersetzt, z. B.

$$N\begin{matrix}CH_3\\CH_3\\CH_3\end{matrix} \quad \text{oder} \quad N\begin{matrix}CH_3\\C_2H_5\\C_3H_7\end{matrix}$$

Trimethylamin — Methyläthylproplyamin.

Sie werden in älteren Lehrbüchern zuweilen auch — wenig glücklich — als Nitrilbasen bezeichnet, was leicht zu Verwechslungen mit den Nitrilen führt. Auch bei den tertiären Basen sind natürlich einfache und gemischte Verbindungen möglich.

Außer diesen drei Klassen von Aminbasen kennt man aber auch noch Basen, die sich vom Ammoniumhydroxyd NH_4OH durch Ersatz aller vier am Stickstoff stehenden Wasserstoffe durch Alkyl ableiten, die sogenannten quartären[1]) Ammoniumbasen, z. B.

$$\begin{matrix}CH_3\\CH_3\\CH_3\end{matrix}>N<\begin{matrix}CH_3\\OH\end{matrix}$$

Tetramethylammoniumhydroxyd,

die im Gegensatz zum Ammoniumhydroxyd und zu den primären, sekundären wie tertiären Ammoniumhydraten beständig sind und starke Basen darstellen, die bezüglich ihrer Ionisation den Alkalien gleichkommen. Ihre Salze, die natürlich aus Base und Säure unter Wasseraustritt entstehen, sind die quartären Ammoniumsalze oder Halogenalkylate. Natürlich gibt es auch Verbindungen, welche in einem Kohlenwasserstoffreste mehrere Ammoniakreste enthalten und die man als Diamine, Triamine usw. oder als Diamino-, Triamino- usw. verbindungen bezeichnet, z. B.

$$H_2N.CH_2.CH_2.NH_2 \qquad C_6H_4<\begin{matrix}NH_2\\NH_2\end{matrix}$$

Aethylendiamin, Diaminoäthan — Phenylendiamin, Diaminobenzol.

Die Darstellung der Amine geschieht im allgemeinen nach ganz verschiedenen Methoden, je nachdem es sich um aromatische oder aliphatische Amine handelt.

[1]) Früher weniger gut als „quaternär" bezeichnet.

Letztere werden in den meisten Fällen wirklich durch Ersatz der Wasserstoffatome im Ammoniak, erstere durch Reduktion sauerstoffhaltiger Verbindungen dargestellt.

Die theoretisch einfachste und zur Darstellung aliphatischer Amine auch häufig angewandte Methode ist die von A. W. Hofmann aufgefundene Einwirkung von Halogenalkylen auf Ammoniak, bei der alle Arten von Basen nebeneinander entstehen. Man kann diese Umsetzung, bei der z. B. in erster Phase aus Aethyljodid und Ammoniak Aethylamin entsteht

$$C_2H_5J + NH_3 = C_2H_5NH_2 + HJ$$

als Austauschreaktion auffassen, richtiger ist es aber offenbar, als erste Reaktion eine Addition anzunehmen, bei der aus Ammoniak und Aethyljodid Aethylammoniumjodid d. i. Aethylaminjodhydrat entsteht

$$H_3N + C_2H_5J = H_3N\langle{}^{C_2H_5}_{J}.$$

Aus diesem macht überschüssiges Ammoniak teilweise Aethylamin frei

$$H_3N\langle{}^{C_2H_5}_{J} + NH_3 = H_2NC_2H_5 + NH_4J.$$

Hierbei bleibt aber die Reaktion nicht stehen, sondern das entstandene Aethylamin addiert zum Teil wiederum Aethyljodid zu Diäthylammoniumjodid und führt so in gleicher Weise zum Diäthylamin

$$H_2NC_2H_5 + C_2H_5J \rightarrow {}^{H}_{H}{}_{J}\rangle N\langle{}^{C_2H_5}_{C_2H_5}$$

$$\rightarrow HN(C_2H_5)_2 + HJ$$

und aus diesem entsteht teilweise in wiederum gleicher Weise Triäthylamin.

$$(C_2H_5)_2NH + C_2H_5J \rightarrow (C_2H_5)_3N\langle{}^{H}_{J}$$

$$\rightarrow (C_2H_5)_3N + HJ.$$

Schließlich addiert aber auch noch das tertiäre Amin ein Molekül Aethyljodid und bildet das quartäre Tetraäthylammoniumjodid, das man auch als Jodäthylat des Triäthylamins bezeichnen kann.

$$(C_2H_5)_3N + C_2H_5J \rightarrow (C_2H_5)_3N\langle{}^{C_2H_5}_{J}.$$

Das Endprodukt der Einwirkung von Halogenalkylen auf Ammoniak ist also immer ein Gemisch der primären, sekundären und tertiären Basen oder ihrer Salze und der quartären Ammoniumsalze, doch kann man durch richtige Auswahl des Verhältnisses zwischen Ammoniak und Halogenalkyl oft erreichen, daß ein bestimmtes Derivat in überwiegender Menge entsteht, wobei auch die Natur des betreffenden Alkylrestes nicht ohne Einfluß ist.[1] Am besten lassen sich nach dieser Methode durch Anwendung eines Ueberschusses von Halogenalkyl die tertiären Amine gewinnen, die auch leicht isolierbar sind. Immerhin muß man, um das gewünschte Produkt zu isolieren, meist ziemlich umständliche Trennungsmethoden anwenden, von denen weiter unten bei den Eigenschaften der Amine (S. 274) noch die Rede sein wird, wenn man es nicht vorzieht, von vornherein eine andere Darstellungsmethode zu wählen, die nur zu einem bestimmten Amin führt.

Für die Reindarstellung der primären aliphatischen Amine ist das bequemste Ausgangsmaterial meist das Phtalimid.

Dieses Säureimid (s. S. 281) ist ein Ammoniak in dem zwei Wasserstoffe durch den leicht wieder abspaltbaren zweiwertigen Rest der Phtalsäure ersetzt sind und in dem das dritte Wasserstoffatom infolgedessen leicht durch Alkalimetall ersetzbar ist.

Die Alkaliverbindung, das Phtalimidkalium, kann, da die Bildung quartärer Verbindungen durch die Gegenwart der Acidylgruppe ausgeschlossen ist, mit dem Halogenalkyl nur eindeutig, d. h. durch Austausch des Kaliums gegen den Alkylrest reagieren, worauf man aus dem entstandenen Alkylphtalimid den Phtalsäurerest durch Erhitzen mit Alkalien oder Säuren wieder abspaltet

$$\underset{\text{Phtalimid}}{C_6H_4\langle{}^{CO}_{CO}\rangle NH} \xrightarrow{KOH} \underset{\text{Phtalimidkalium}}{C_6H_4\langle{}^{CO}_{CO}\rangle NK}$$

$$\xrightarrow{C_2H_5J} \underset{\text{Aethylphtalimid}}{C_6H_4\langle{}^{CO}_{CO}\rangle NC_2H_5}$$

$$\xrightarrow{H_2O} \underset{\text{Phtalsäure}}{C_6H_4\langle{}^{COOH}_{COOH}} + \underset{\text{Aethylamin}}{H_2NC_2H_5}$$

Sekundäre aliphatische Amine erhält man häufig bequem, indem man im Anilin, dem einfachsten primären aromatischen Amin, beide noch am Stickstoff vorhandenen Wasserstoffatome durch Behandlung mit Halogenalkyl gegen Alkyl austauscht, was sich durch Anwendung eines Ueberschusses an Halogenalkyl ziemlich glatt erreichen läßt. Das so erhaltene Dialkylanilin verwandelt man mit salpetriger Säure (s. S. 274) in die p-Nitrosoverbindung, die sich mit Alkali glatt in Nitrosophenol und das gewünschte sekundäre Amin spalten läßt

$$\underset{\text{Anilin}}{C_6H_5.NH_2} \xrightarrow{C_2H_5J} \underset{\text{Diäthylanilin}}{C_6H_5.N(C_2H_5)_2}$$

$$\xrightarrow{HNO_2} \underset{\text{p-Nitrosodiäthylanilin}}{NO.C_6H_4.N(C_2H_5)_2} \xrightarrow{H_2O} \underset{\text{Nitrosophenol}}{NO.C_6H_4.OH} + \underset{\text{Diäthylamin}}{HN(C_2N_5)_2}$$

[1]) Die den tertiären Alkoholen entsprechenden Halogenalkyle liefern mit Ammoniak überhaupt keine Amine sondern Olefine.

Wie ohne weiteres verständlich ist, kann man nach den geschilderten Methoden auch *gemischte Amine* gewinnen, indem man in ein primäres oder sekundäres Amin in gleicher Weise eine weitere andersartige Alkylgruppe einführt. Will man auf diese Weise ein primäres Amin in ein gemischtes sekundäres überführen, so führt man, um die Reaktion einheitlich zu gestalten, zweckmäßig erst eine Acidylgruppe ein, die man schließlich wieder abspaltet

$$C_6H_5.NH_2 \xrightarrow{CH_3COOH} C_6H_5.N\begin{matrix}H\\CO.CH_3\end{matrix}$$

Anilin — Acetanilid

$$\xrightarrow{C_2H_5J} C_6H_5.N\begin{matrix}C_2H_5\\CO.CH_3\end{matrix} \xrightarrow{H_2O}$$

Aethylacetanilid

$$C_6H_5.N\begin{matrix}C_2H_5\\H\end{matrix} + CH_3.COOH.$$

Aethylanilin

Alle bisher besprochenen Methoden beruhen auf der Umsetzung von Halogenalkylen mit Ammoniak und Ammoniakderivaten und sind wie alle analogen Substitutionen nur ausführbar, wenn das Halogen an einem aliphatischen Rest haftet, während sie im allgemeinen versagen, wenn das Halogen *direkt* an einem aromatischen Kern steht.

Bemerkenswert ist jedoch, daß Dikaliumanilin $C_6H_5NK_2$ und Kalium- oder Natriumdiphenylamin $(C_6N_5)_2NK$ mit Brombenzol *Triphenylamin* liefern. Mit Ammoniak reagieren aromatische gebundene Halogenatome nur dann, wenn am selben Kern noch mehrere Halogenatome oder Nitrogruppen stehen.

Sofern es sich um Einführung von Methylgruppen in Ammoniak oder Ammoniakderivate handelt, benutzt man an Stelle der Halogenverbindung meist praktischer *Dimethylsulfat*.

Der eben besprochenen Methode, die mit ihren Abarten die allgemeinste Darstellungsmethode für aliphatische Amine ist, steht eine andere Methode gegenüber, die in allererster Linie in Frage kommt, wenn es sich um die Darstellung *aromatischer Amine* handelt. Es ist die *Reduktion von Nitroverbindungen*, die sich zwar auch bei aliphatischen Verbindungen ausführen läßt, für diese aber keine größere Wichtigkeit besitzt, weil hier die Ausgangsmaterialien schwieriger zugänglich sind. Dagegen erlaubt sie ganz allgemein, die leicht darstellbaren aromatischen Nitroverbindungen in die für die Farbstofftechnik so wichtigen aromatischen Amine überzuführen und ist dadurch eine der wichtigsten Methoden der chemischen Großtechnik. Naturgemäß führt die zuerst von *Zinin* verwirklichte Reduktion von Nitroverbindungen nur zu primären Aminen. Sekundäre und tertiäre aromatische Amine werden aus den primären gewonnen (s. S. 271, 273 und 274).

Die Reduktion der Nitrogruppe zur Aminogruppe geschieht in den meisten Fällen durch Wasserstoff in statu nascendi und zwar in saurer Lösung

$$C_6H_5.NO_2 + 6H = C_6H_5.NH_2 + 2H_2O$$

Im Laboratorium wendet man zur Reduktion meist Zinn oder Zinnchlorür und starke Salzsäure an, während in der Technik das viel billigere Eisen benutzt wird. Von Interesse ist hierbei, daß man nur etwa $^1/_{40}$ der von der Gleichung

$$C_6H_5.NO_2 + 2Fe + 6HCl = C_6H_5NH_2 + Fe_2Cl_6 + 2H_2O.$$

erforderten Salzsäuremenge verwendet, daß also die Reduktion offenbar im wesentlichen durch Eisen und Wasser nach der Gleichung

$$C_6H_5.NO_2 + 2Fe + 4H_2O + C_6H_5.NH_2 + Fe_2(OH)_6$$

bewirkt wird, wobei das zuerst gebildete Eisenchlorür als Wasserstoffüberträger dient. Außerdem wendet man zur Gewinnung von Aminen aus Nitroverbindungen noch häufig Schwefelammonium in alkoholischer Lösung an. Der Wert dieses Reduktionsmittels liegt namentlich darin, daß es gestattet, in Polynitroverbindungen nur eine der vorhandenen Nitrogruppen zu reduzieren und so zu Nitroaminoverbindungen zu gelangen

$$C_6H_4{<}\begin{matrix}NO_2\\NO_2\end{matrix} + 3H_2S = C_6H_4{<}\begin{matrix}NH_2\\NO_2\end{matrix} + 2H_2O + 3S$$

Dinitrobenzol — Nitranilin

Auch andere Reduktionsmittel werden in manchen Fällen benutzt, doch entstehen unter gewissen Bedingungen bei der Reduktion der Nitroverbindungen Phenylhydroxylamine beziehungsweise Azoxy-, Azo- oder Hydrazoverbindungen.

Neben den beiden besprochenen Reaktionen zur Gewinnung von Aminen treten alle anderen dem gleichen Zweck dienenden Methoden an Wichtigkeit zurück. Erwähnt werden möge hier gleich, daß man auch alle möglichen anderen Stickstoffverbindungen, sofern sie nur Verkettungen von Kohlenstoff und Stickstoff enthalten, zu Aminen reduzieren kann. So lassen sich Nitrosoverbindungen, Oxime, Aldehydammoniakverbindungen, Aldehydalkylimide und Hydrazinderivate zu Aminen reduzieren. Auch Säureamide liefern bei der Reduktion zuweilen in recht guter Ausbeute primäre Amine. Alle diese Reaktionen sind in gewissen Fällen praktisch sehr brauchbar. Wichtig ist es, daß man auch durch Addition von naszierendem Wasserstoff an Nitrile zu primären Aminen gelangt. Ist auch diese sogenannte *Mendiussche* Reaktion nur bei einigen höheren Nitrilen praktisch gut durchführbar, so besitzt sie doch ein großes theoretisches Interesse, indem sie den synthetischen Aufbau der Amine und Alkohole vermittelt

$$X.NH_2 \rightarrow X.OH \rightarrow XBr \rightarrow X.CN \rightarrow X.CH_2.NH_2$$

Wesentlich historisches Interesse besitzt die zuerst von *Würtz* zu Reindarstellung von primären Aminen benutzte Zersetzung der Isocyansäureester mit Kalilauge (s. S. 281)

$$C_2H_5.N:C:O + H_2O = C_2H_5.NH_2 + CO_2,$$

doch beruht auf ihr die *Hofmannsche*

Methode zum Abbau der Säureamide zu den um ein Kohlenstoffatom ärmeren primären Aminen. Diese Methode, die sowohl zu aliphatischen als auch zu aromatischen primären Aminen führt, besitzt auch erhebliche technische Wichtigkeit. Zur Deutung der ziemlich komplizierten Reaktion, die durch Einwirkung von Chlor oder Brom und Alkalilauge auf das Säureamid vor sich geht und z. B. Acetamid in Methylamin überführt, nimmt man gewöhnlich folgende Reihe von Umsetzungen an. Zunächst wird ein Wasserstoffatom der NH_2-Gruppe durch das Brom substituiert und das entstehende Bromamid (II) bildet in seiner tautomeren Form ein Alkalisalz (III). Dasselbe erleidet eine Umlagerung, die der sogenannten Beckmannschen Umlagerung der Oxime (s. S. 297) analog verläuft und in einem Platzwechsel von Br und CH_3-Gruppe besteht. Hierdurch entsteht ein Körper (IV), der am gleichen Kohlenstoffatom ein Bromatom und eine ONa-Gruppe enthält und infolgedessen sogleich Bromnatrium abspaltet. Der so gebildete Isocyansäureester (V) zerfällt dann im Sinne der vorher erwähnten Würtzschen Reaktion unter Aufnahme von H_2O in CO_2 und Amin (VI)

$$\text{(I)}\ \begin{matrix} CH_3.CO \\ NH_2 \end{matrix} \longrightarrow \text{(II)}\ \begin{matrix} CH_3.CO \\ BrNH \end{matrix}$$

$$\longrightarrow \text{(III)}\ \begin{matrix} CH_3.C.ONa \\ \| \\ BrN \end{matrix} \longrightarrow \text{(IV)}\ \begin{matrix} Br.C.ONa \\ \| \\ CH_3.N \end{matrix}$$

$$\longrightarrow \text{(V)}\ \begin{matrix} C:O \\ \| \\ CH_3.N \end{matrix} \longrightarrow \text{(VI)}\ \begin{matrix} CO_2 \\ \\ CH_3.NH_2 \end{matrix}$$

In dieser Form liefert die Methode in der aliphatischen Reihe zwar nur in den niederen Gliedern gute Ausbeuten, weil die höheren aliphatischen Amine leicht durch weitere Einwirkung der alkalischen Bromlösung in Nitrile übergehen (s. S. 284), doch läßt sich dieser Uebelstand einmal durch gewisse Modifikationen vermeiden und dann ist die Methode auch in der aromatischen Reihe vortrefflich verwendbar, wie namentlich die analog verlaufende technische Gewinnung der für die Indigosynthese wichtigen Anthranilsäure (o-Aminobenzoesäure) aus Phtalimid zeigt.

Aehnlich wie diese Umsetzung verläuft anscheinend die Curtiussche Ueberführung der Säureazide in die um ein Kohlenstoff niedrigeren Amine

$$X.CO.N\left\langle\begin{matrix} N \\ \| \\ N \end{matrix}\right. \longrightarrow X.NH_2,$$

die in dem Artikel „Azokörper" bei den Aziden näher besprochen wird.

Die sonst noch bekannten Reaktionen, bei denen Amine entstehen, können kein größeres Interesse beanspruchen, abgesehen von der auch in der Technik angewandten Bildung des Diphenylamins und seiner Homologen beim Erhitzen von Anilin mit Anilinchlorhydrat

$$C_6H_5.NH_2 + HCl, H_2NC_6H_5 = C_6H_5.NH.C_6H_5 + HCl, NH_3$$

Derivate des Diphenylamins entstehen auch bei der sogenannten Semidinumlagerung (s. S. 303).

Eigenschaften und Umsetzungen der Amine und Ammoniumhydroxyde. Die Mono-, Di- und Trialkylammoniumsalze werden, da die betreffenden Ammoniumhydroxyde unbeständig sind, von Alkali unter Bildung der freien primären, sekundären und tertiären Amine zersetzt und diese können, da sie entweder flüchtig oder in Wasser wenig löslich sind, leicht abgeschieden werden. Im Gegensatz hierzu werden die Tetraalkylammoniumsalze, da die quartären Ammoniumbasen beständig, unflüchtig, in Wasser löslich und stark ionisiert sind, von Alkali unter den gewöhnlichen Bedingungen, d. h. in wässeriger Lösung, nicht wesentlich zersetzt. Hierauf beruht bei der zuerst besprochenen Darstellungsmethode die Trennung der quartären Verbindungen von den primären, sekundären und tertiären Aminen.

Um die quartären Ammoniumhydroxyde aus ihren Salzen in Freiheit zu setzen, benutzt man feuchtes Silberoxyd.

Die niedrigsten Amine sind bei gewöhnlicher Temperatur gasförmig und ähneln dem Ammoniak außerordentlich, sind aber brennbar. Mit zunehmender Kohlenstoffzahl steigt im allgemeinen der Siedepunkt, während die Löslichkeit in Wasser abnimmt. Die höchsten Amine sind feste, in Wasser unlösliche, geruchlose Körper. Die Siedepunkte einiger Amine sind in folgender Tabelle zusammengestellt

Alkylrest	Primäres Amin	Sekundäres Amin	Tertiäres Amin
Methyl	— 7°	+ 7°	+ 4°
Aethyl	+ 19°	56°	90°
n-Propyl	49°	110°	156°
Isopropyl	32°	84°	—
n-Butyl	78°	160°	217°
n-Hexyl	129°	—	260°
Phenyl	184°	310°	—
Benzyl	185°	300°	—
o-Tolyl	199°	314°	—

Viele Amine verbinden sich mit einem Molekül Wasser zu — meist flüssigen — Hydraten, die aber anscheinend nicht die entsprechenden Ammoniumhydroxyde, sondern additionelle Verbindungen sind.

Wichtig ist es, daß in allen Alkylaminen die Alkylgruppen außerordentlich fest am Stickstoff haften. Amine werden weder beim Kochen mit Säuren noch mit Alkalien gespaltet.

Abgesehen von der — eingangs besprochenen — allen Aminen mit Ausnahme der Triphenylamine gemeinsamen Fähigkeit mit Säuren Salze des fünfwertigen Stickstoffs zu bilden, unterscheiden sich die drei Klassen von Aminen in chemischer Beziehung stark voneinander. Der Unterschied beruht im allgemeinen darauf, daß die primären und sekundären Amine vermöge des am Stickstoff noch vorhandenen Wasserstoffs zur Reaktion mit vielen Agentien befähigt sind, gegen die die tertiären Amine vollkommen beständig sind. So ist es möglich in primäre und sekundäre Amine weitere Alkylgruppen oder auch Acidylgruppen einzuführen, d. h. sie reagieren noch mit Halogenalkylen und Säurechloriden oder -anhydriden. Namentlich die Acylierung erlaubt eine leichte Unterscheidung zwischen primären oder sekundären und tertiären Basen. Hierher gehört auch die bei den Säureamiden zu besprechende Harnstoff- und Thioharnstoffbildung der primären und sekundären Amine sowie das Verhalten der Amine gegen Benzolsulfochlorid (s. S. 277), das häufig eine Trennung der bei der Darstellung nebeneinander entstehenden drei Arten von aliphatischen Aminen gestattet.

Das Prinzip dieser Trennung zeigt folgende Zusammenstellung:

Art der Base	Liefert mit Benzolsulfochlorid	Verhalten des Produktes gegen wässeriges Alkali
Primär	Monoalkylsulfamid	Löslich. Unflüchtig.
Sekundär	Dialkylsulfamid	Unlöslich. Unflüchtig.
Tertiär	Unveränderte Base	Mit Dampf flüchtig.

Aus den isolierten Sulfamiden lassen sich wie aus allen Säureamiden die Aminbasen durch Hydrolyse regenerieren.

Besonders charakteristisch ist das Verhalten der drei Klassen von Aminbasen gegen salpetrige Säure. Die primären aliphatischen Amine werden von diesem Agens schon in der Kälte in Alkohole verwandelt (Ia), während die primären aromatischen Amine in der Kälte Diazoniumverbindungen liefern, die beim Erhitzen zerfallen und zwar meist unter Bildung von Phenolen (Ib) (vgl. den Artikel „Azokörper"). Alle sekundären Amine werden von salpetriger Säure in Nitrosamine verwandelt, indem das am Stickstoff stehende Wasserstoffatom durch die N:O-Gruppe substituiert wird (II). Die tertiären aliphatischen Amine werden von salpetriger Säure nicht verändert, während bei Gegenwart eines aromatischen Kerns eine Nitrosogruppe in die p-Stellung des letzteren eintritt (IIIb).

I a) $Alph.NH_2 \rightarrow Alph.OH + N_2 + H_2O$
b) $Ar.NH_2 \rightarrow$
$ArN_2OH \rightarrow Ar.OH + N_2$
II. $(Alk)_2NH \rightarrow (Alk)_2N.NO + H_2O$
III a) $(Alph)_3N \rightarrow$ Unverändert
b) $(Alk)_2N.C_6H_5 \rightarrow (Alk)_2N.C_6H_4.NO + H_2O$

Auch mit Hilfe dieser Reaktionen kann man das bei der Darstellung aliphatischer Amine erhaltene Basengemisch trennen, wenn nur auf die Isolierung der sekundären und tertiären Base Wert gelegt wird. Nach der Behandlung mit salpetriger Säure können die Nitrosamine aus der sauren Lösung leicht durch Abheben oder Ausschütteln abgetrennt und durch Erhitzen mit Salzsäure in die sekundären Amine zurückverwandelt werden, während die unverändert gebliebenen tertiären Basen nach dem Zusatz von Alkali abdestilliert werden. Die primären Basen werden bei dieser Methode allerdings zerstört, d. h. in Alkohole verwandelt.

Die p-Nitrosoverbindungen der Dialkylaniline sind wichtige Zwischenprodukte der Farbstoffindustrie. Sie liefern bei der Reduktion p-Aminoverbindungen und zerfallen mit Alkali in p-Nitrosophenol und Dialkylamine (s. S. 271 und 299).

Bei der Oxydation gehen die primären und sekundären Basen zunächst in Alkylhydroxylamine über, die aber gewöhnlich sofort weiter oxydiert werden (s. S. 289), während die tertiären Basen Trialkylaminoxyde (S. 290) liefern.

Eine nur den primären Basen zukommende Reaktion ist die Bildung von Isonitrilen (Carbylaminen s. S. 287) beim Erwärmen mit Chloroform und alkoholischer Kalilauge

$$Alk.NH_2 + HCCl_3 + 3KOH = Alk.NC + 3KCl + 3H_2O$$

Da die Isonitrile einen charakteristischen äußerst widerlichen und intensiven Geruch besitzen, benutzt man diese Reaktion zum Beweis der primären Natur eines Amins.

Die Mono- und Dialkylaniline, von denen namentlich das Dimethylanilin in der Farbstofftechnik in allergrößtem Maßstabe gebraucht wird, werden aus dem Anilin durch weitere Alkylierung nach der erstgenannten Methode gewonnen, nur benutzt man in der Technik an Stelle der Halogenalkyle die betreffenden Alkohole und Salzsäure oder Schwefelsäure.

Wichtig ist es, daß die Alkyl- und Dialkylaniline bei Gegenwart von Salzsäure bei höherer Temperatur die Alkylgruppen ziemlich leicht als Chloralkyl wieder abspalten und daß bei noch höherer Temperatur das Chloralkyl mit dem Benzolrest reagiert, so daß Alkylgruppen in den Kern eintreten. Die sekundären oder tertiären Basen gehen also bei dieser Reaktion, die natürlich in Druckgefäßen ausgeführt werden muß, in kernsubstituierte primäre Basen über. So entsteht aus Methylanilin p-Toluidin

$$C_6H_5.NHCH_3 \rightarrow CH_3.C_6H_4\ NH_2$$

aus Dimethylanilin as-m-Xylidin und in gleicher Weise auch aus dem quartären Trimethylphenylammoniumjodid Mesidin. Diese „Wanderung der Alkyle" bildet für manche Homologe des Anilins eine brauchbare technische Darstellungsmethode.

Vorkommen der Amine. In der Natur kommen von den Aminen fertig gebildet nur Methylamin und Trimethylamin in einigen Pflanzen vor. Alle drei Methylamine entstehen häufig bei der Zersetzung stickstoffhaltiger Naturprodukte, so in der Heringslake, im Knochenöl, in den Destillationsprodukten des Holzes und der Rübenzuckerschlempe usw.

Die quartären Ammoniumhydroxyde, über deren Gewinnung im vorstehenden alles Nötige gesagt ist, können in nichtwässeriger Lösung, z. B. in Alkohol, aus ihren Salzen auch durch Alkali in Freiheit gesetzt werden, während sie in wässeriger Lösung aus ihren Salzen durch feuchtes Silberoxyd erhalten werden (s. S. 273). Sie sind meist farblose, zerfließliche, kristallinische Massen, die den fixen Alkalien, denen sie hinsichtlich der Basizität nahe kommen, ähnlich reagieren. Sie sind leicht löslich in Wasser und bilden mit demselben Hydrate. Beim Erhitzen zerfallen sie in tertiäre Basen und Alkohol oder Olefin und Wasser; Tetramethylammoniumhydroxyd liefert Trimethylamin und Methylalkohol.

$$(CH_3)_4NOH \rightarrow (CH_3)_3N + CH_3OH.$$

Stereoisomerie. Durch Kombination der vorher beschriebenen Darstellungsmethoden kann man quartäre Ammoniumsalze gewinnen, in denen alle vier am Stickstoff haftenden Alkylgruppen untereinander verschieden sind. Bei solchen Verbindungen kann — ähnlich wie am asymmetrischen Kohlenstoffatom — Stereoisomerie auftreten, und es ist auch in der Tat gelungen, solche Basen in optisch-aktive Antipoden zu spalten. Am dreiwertigen Stickstoff scheint derartige Stereoisomerie nicht möglich zu sein. Hieraus kann man schließen, daß die drei Valenzrichtungen des Stickstoffatoms in einer Ebene liegen (vgl. jedoch S. 294). Andererseits erhält man identische Tetraalkylammoniumverbindungen, ganz gleich in welcher Reihenfolge man die verschiedenen Alkylreste einführt. Das Jodmethylat des Aethylpropylbenzylamins, das Jodäthylat des Methylpropylbenzylamins, das Jodpropylat des Methyläthylbenzylamins und schließlich das Jodbenzylat des Methyläthylpropylamins sind völlig identisch.

Mehrwertige Amine werden in ganz analoger Weise erhalten, wie die einwertigen. Mehrwertige Amine welche zwei Aminogruppen am selben Kohlenstoffatom enthalten, sogenannte gem-Diamine[1]), sind unbeständig und nur in Form von Derivaten isolierbar (s. S. 280). Von Wichtigkeit sind in der aliphatischen Reihe nur einige diprimäre Diamine, welche sich von den normalen Kohlenwasserstoffen ableiten und die Aminogruppen an den beiden Endgliedern der Kohlenstoffkette tragen. Einige derselben, so das 1,4-Diaminobutan (Tetramethylendiamin oder Putrescin) und das 1,5-Diaminopentan (Pentamethylendiamin oder Cadaverin) entstehen häufig bei Fäulnisprozessen stickstoffhaltiger Naturprodukte.

Abgesehen von denjenigen Reaktionen, welche die Diamine mit den einfachen Aminen gemeinsam haben, ist es für die Diamine, welche zwischen den beiden Aminogruppen drei bis fünf Kohlenstoffe enthalten, charakteristisch, daß sie beim Erhitzen ihrer Chlorhydrate Salmiak abspalten und in zyklische „Imine" übergehen (s. S. 279).

$$CH_2\begin{cases} CH_2-CH_2-NH_2,\ HCl \\ CH_2-CH_2-NH_2,\ HCl \end{cases}$$

Pentamethylendiamin

$$\rightarrow CH_2\begin{cases} CH_2-CH_2 \\ CH_2-CH_2 \end{cases}NH, HCl + NH_3, HCl$$

Pentamethylenimin
Piperidin

Aethylendiamin liefert hierbei nicht das entsprechende Aethylenimin, sondern Diäthylendiimin (Piperazin)

$$2H_2N.CH_2.CH_2.NH_2$$

$$\rightarrow NH\begin{cases} CH_2\ \ CH_2 \\ CH_2\ \ CH_2 \end{cases}NH$$

während die höheren Glieder sich in komplizierterer Weise zersetzen.

Die aromatischen Diamine, die durch Reduktion von Dinitroverbindungen oder von Nitroaminoverbindungen gewonnen werden, sind feste, meist unzersetzt destillierende Substanzen, die ziemlich empfindlich gegen Oxydationsmittel sind. Die o-Diamine sind wichtig durch ihre Fähigkeit, sich mit den verschiedensten Agentien unter Schliessung eines neuen stickstoffhaltigen Ringsystems zu kondensieren

$$C_6H_4(NH_2)_2 + HO\text{—}C(CH_3)\text{=}O =$$

$$C_6H_4\begin{cases} NH \\ N \end{cases}C.CH_3 + 2H_2O$$

[1]) geminal von geminus = Zwilling.

Solche „Orthokondensationen" finden namentlich statt mit Fettsäuren, Aldehyden, α-Diketonen, mit salpetriger Säure und bei der Einwirkung von Oxydationsmitteln. Die als Imidazole, Aldehydine, Chinoxaline, Azimide, Phenazine usw. bezeichneten Produkte werden in dem Artikel „Heterozyklische Systeme" behandelt.

m-Diamine liefern mit salpetriger Säure braune Aminoazofarbstoffe. Vermöge dieser Reaktion wird m-Phenylendiamin als empfindliches Reagens auf salpetrige Säure benutzt.

p-Diamine lassen sich leicht zu Chinonen oxydieren und liefern ebenfalls wichtige Farbstoffe.

Von großer Wichtigkeit für die Farbstofftechnik ist das Benzidin, das Di-p-diaminodiphenyl, von dessen eigenartiger Bildung bei der sogenannten „Benzidinumlagerung" der Hydrazoverbindungen später (s. S. 303) die Rede sein wird.

Auch höherwertige Amine sind bekannt, haben aber keine große Wichtigkeit.

Da man die Darstellung der Amine nicht nur als Einführung von Alkylresten in Ammoniak, sondern natürlich auch als Einführung von Aminogruppen in Kohlenwasserstoffe auffassen kann, ist es ohne weiteres verständlich, daß man durch Modifikation der angeführten Methoden auch alle möglichen anderen Verbindungen darstellen kann, die außer dem Ammoniakrest noch andere charakteristische Gruppen enthalten, so aliphatische Aminosäuren aus chlorsubstituierten Fettsäuren mit Ammoniak, aromatische Aminosäuren durch Reduktion von Nitrosäuren usw. Alle diese Verbindungen lassen sich als Ammoniakderivate auffassen. Ihre Zahl ist aber so groß, daß sie im Rahmen dieses Artikels nicht näher behandelt werden können.

Eine besondere, nicht unwichtige Klasse von Aminen bilden die sogenannten Aldehydammoniake, Körper, die ganz allgemein aus Aldehyden durch Anlagerung von Ammoniak entstehen (siehe S. 280 und den Artikel „Aldehyde")

$$X.C\begin{cases}O\\H\end{cases} + NH_3 = X.C\begin{cases}OH\\NH_2\\H\end{cases}$$

Zum Schluß möge erwähnt werden, daß man die am Stickstoff stehenden Wasserstoffatome der Amine auch durch Halogene (Halogenamine s. S. 280 und 284), Nitrogruppen (Nitroamine) und ähnliche Gruppen ersetzen kann. Diese Verbindungen besitzen jedoch mit Ausnahme der schon besprochenen Nitrosamine lediglich theoretisches Interesse.

Es sei hier darauf hingewiesen, daß die Nitroamine und die kaum bekannten, von primären Aminen abgeleiteten Nitrosamine in naher Beziehung zu den Diazoverbindungen stehen (s. den Artikel „Azokörper").

Daß unter dem acidifizierenden Einfluß aromatischer Gruppen in den Phenylaminen der am Stickstoff stehende Wasserstoff auch durch Alkalimetall ersetzbar wird, ist eingangs erwähnt worden.

β) Säureamide. Aehnlich wie Alkylgruppen lassen sich Acidylgruppen X.CO. in Ammoniak und in Amine einführen. Die so entstehenden Körper $X_2N.CO.X$ lassen sich nicht nur als Acidylamine, d. h. als substituiertes Ammoniak auffassen, sondern auch als Säuren X.COOH, deren Hydroxylgruppe durch eine einfache oder substituierte Aminogruppe ersetzt ist. Diese Auffassung der Acidylamine als Säureamide ist für die einfacheren Verbindungen dieser Art zweckmäßiger und darum gebräuchlicher. Man kann auch hier wie bei den Alkylaminen primäre, sekundäre und tertiäre Säureamide unterscheiden, je nachdem eine, zwei oder drei Wasserstoffatome eines Ammoniakmoleküls durch Acidylgruppen vertreten sind. Von größerer Wichtigkeit sind nur die primären Amide. Acylverbindungen, welche den quartären Ammoniumverbindungen entsprechen, sind nicht bekannt. Außerdem sind in großer Anzahl gemischte Amide bekannt, in denen die Wasserstoffe eines Ammoniakmoleküls teils durch Acidyl-, teils durch Alkylgruppen ersetzt sind und die man entweder als alkylierte Säureamide oder als acylierte Alkylamine benennen kann. Besonders gebräuchlich ist es, phenylierte Säureamide als „Anilide", „Toluide" usw. zu bezeichnen.

Die Darstellung der Säureamide beruht in den allermeisten Fällen darauf, daß man Säuren oder deren Derivate mit Ammoniak oder Aminen in Reaktion bringt. Der prinzipielle Unterschied zwischen aliphatischen und aromatischen Amiden fällt hier fort, da ja das Stickstoffatom der Amide immer erst durch Vermittelung der CO-Gruppe mit dem Alkyl der Säure in Verbindung steht, also nach dieser Seite hin immer „aliphatisch gebunden" ist (s. S. 270 und 272).

Die gebräuchlichste Methode zur Gewinnung von Amiden ist die Einwirkung von Säurechloriden Alk.COCl oder Säureanhydriden $(Alk.CO)_2O$ auf Ammoniak oder primäre und sekundäre Amine. Dieselbe verläuft fast immer schon bei gewöhnlicher Temperatur oder doch bei mäßigem Erwärmen. Unter diesen Bedingungen entstehen nur primäre Amide

$$\underset{\text{Benzoylchlorid}}{C_6H_5.CO.Cl} + NH_3 = \underset{\text{Benzamid}}{C_6H_5.CO.NH_2} + HCl$$

$$\underset{\text{Essigsäureanhydrid}}{\begin{matrix}CH_3.CO\\CH_3.CO\end{matrix}O} + 2H_2NC_6H_5 =$$

$$\underset{\text{Acetanilid}}{2CH_3.CO.NH.C_6H_5} + H_2O.$$

Beide Abarten der Methode sind namentlich für die Gewinnung der Amide höherer Säuren und der alkylierten Säureamide wichtig. Die einfachen Amide der niedrigeren Fettsäuren werden meist anders erhalten. Für höhere Säuren ist im allgemeinen die Verwendung der Chloride am bequemsten. Je nach der Beständigkeit der verwendeten Anhydride oder Chloride ändert man die Reaktionsbedingungen. Bei den gegen Wasser empfindlichen Derivaten der aliphatischen Säuren arbeitet man in indifferenten Lösungsmitteln oder ohne Lösungsmittel, während man die aromatischen Säurechloride in wässeriger und sogar in alkalischer Lösung verwenden kann.

Wegen der vorzüglichen Kristallisationsfähigkeit der Säureamide wird diese Methode zur Isolierung und Identifizierung sowohl von Säuren als auch von Aminbasen außerordentlich häufig benutzt. Im ersten Falle wird die fragliche Säure in ihr Chlorid verwandelt und dies in einem indifferenten Lösungsmittel mit Anilin oder Toluidin umgesetzt. Im zweiten Falle wird die fragliche Base meist mit Benzoylchlorid und starker Natronlauge geschüttelt. Diese, gewöhnlich als Schotten-Baumannsche Reaktion bezeichnete Benzoylierung von Basen wird besonders viel angewandt. Auch die mit Essigsäureanhydrid, seltener mit Acetylchlorid ausgeführte Acetylierung von Basen dient dem gleichen Zweck.

Ganz ebenso wie die Amide der gewöhnlichen Carbonsäuren entstehen auch die Sulfamide, die Amide der Sulfosäuren, aus den Chloriden der Sulfosäuren mit Ammoniak und primären oder sekundären Aminbasen (s. S. 274)

$$C_6H_5.SO_2Cl + NH_3 = C_6H_5.SO_2.NH_2 + HCl$$

Benzolsulfochlorid Benzolsulfamid

Eine Abart derselben Methode zur Gewinnung von Säureamiden, die aber sehr viel weniger allgemein anwendbar ist, ist die Umsetzung von Säureestern mit Ammoniak oder primären und sekundären Aminen

$$CH_3.COOC_2H_5 + NH_3 = CH_3.CONH_2 + C_2H_5OH$$

Diese Reaktion verläuft bei den in Wasser löslichen Estern der niedrigeren Fettsäuren schon in der Kälte und ziemlich glatt. Bei den Estern höherer Säuren muß in Druckgefäßen erhitzt werden. Das Ergebnis ist hier meist schlecht.

Besonders geeignet für die Darstellung der Amide der niedrigeren Fettsäuren ist die Einwirkung der freien Säuren auf Ammoniak oder primäre und sekundäre Amine, oder, richtiger gesagt, die Wasserabspaltung aus den Ammoniak- oder Aminsalzen der Säuren durch Erhitzen

$$CH_3.COOH + NH_3 = CH_3.COONH_4 = CH_3.CONH_2 + H_2O$$

Die niedrigeren Amide werden meist hergestellt, indem man das Ammoniumsalz z. B. Ammoniumacetat für sich auf etwa 200 bis 250° erhitzt oder — weniger gut — der trockenen Destillation unterwirft. Die alkylsubstituierten Amide, namentlich die Anilide der niedrigeren Fettsäuren, werden oft durch einfaches Kochen eines Gemischs von Base und freier Säure gewonnen, wobei natürlich intermediär die Salze entstehen. So erhält man beim Kochen von Anilin mit Eisessig Acetanilid

$$CH_3.COOH + H_2NC_6H_5 = CH_3.CO.NH.C_6H_5 + H_2O.$$

Außerdem kann man die einfachen primären Amide noch durch Addition von Wasser an die Säurenitrile erhalten

$$C_6H_5.C \equiv N + H_2O = C_6H_5.C\begin{matrix} \nearrow O \\ \searrow NH_2 \end{matrix}$$

Benzonitril Benzamid

Die Wasseranlagerung im gewünschten Sinne gelingt meist durch Einwirkung von starker Salzsäure oder von konzentrierter Schwefelsäure mit Eisessig oder auch von alkalischer Wasserstoffsuperoxydlösung.

In ganz analoger Weise entstehen durch Addition von Schwefelwasserstoff Thiamide

$$CH_3.C \equiv N + H_2S = CH_3.C\begin{matrix} \nearrow S \\ \searrow NH_2 \end{matrix}$$

Thiacetamid

Die sekundären und tertiären Amide entstehen nur schwierig. Man erhält sie durch weiteres Erhitzen der primären Amide oder ihrer Alkaliverbindungen (s. S. 278) mit Säurechloriden

$$C_6H_5.CO.NH_2 + C_6H_5.COCl = (C_6H_5.CO)_2NH + HCl$$

Benzamid Benzoylchlorid Dibenzamid

$$C_6H_5.CO.NH_2 + 2\,C_6H_5.COCl = (C_6H_5.CO)_3N + 2\,HCl$$

Tribenzamid

Sekundäre Amide der Fettsäuren entstehen auch durch Erhitzen der primären Amide im trockenen Salzsäurestrom

$$2\,CH_3.CONH_2 + HCl = (CH_3.CO)_2NH + NH_4Cl$$

Acetamid Diacetamid

oder beim Erhitzen der Nitrile mit den freien Säuren auf 200°

$$CH_3.CN + CH_3.COOH = (CH_3.CO)_2HN$$

Acetonitril Essigsäure Diacetamid

Analog entstehen tertiäre aliphatische Amide beim Erhitzen der Säurenitrile mit den Säureanhydriden.

$$CH_3.CN + (CH_3.CO)_2O = (CH_3.CO)_3N.$$

Triacetamid

Alkylierte Amide können nicht nur, wie aus dem Vorhergehenden hervorgeht, durch Acylierung von primären und sekundären Aminen, sondern auch durch Alkylierung von Amiden dargestellt werden. Dies geschieht am besten, indem man die Natriumverbindungen der Amide mit Kaliumalkyl-

sulfaten oder — weniger gut — mit Halogenalkylen erhitzt

$$X.CONHNa + KSO_4Alph = X.CO.NH.Alph + KNaSO_4$$

Namentlich theoretisch wichtig ist die bei den Oximen ausführlicher zu besprechende Bildung von Alkylamiden durch die sogenannte „Beckmannsche Umlagerung“ (s. S. 297).

Eigenschaften und Umsetzungen der Säureamide. Die Säureamide sind — abgesehen von dem bei gewöhnlicher Temperatur flüssigen Formamid — feste, kristallinische, farblose Substanzen. Die niederen Glieder sind unzersetzt destillierbar und in Wasser löslich. Ein prinzipieller Unterschied zwischen aliphatischen und aromatischen Amiden existiert nicht, doch zeigt sich auch hier, wie immer, die „acidifizierende Wirkung“ aromatischer Reste. Wie schon erwähnt, werden die basischen Eigenschaften des Ammoniaks durch den Eintritt von Acidylgruppen fast völlig aufgehoben. Zwar vereinigen sich sowohl aliphatische als auch aromatische Amide mit starken Mineralsäuren zu salzartigen Verbindungen — so bildet Acetamid ein Chlorhydrat und ein Nitrat — doch zerfallen diese Salze sehr leicht und werden schon durch Wasser gespaltet. Etwas stärker basisch sind die Amide, welche am Stickstoff noch eine aliphatische Alkylgruppe enthalten.

Dagegen finden sich die bei den Aminen erst unter dem acidifizierenden Einfluß von aromatischen Gruppen auftretenden sauren Eigenschaften bei den Säureamiden in verstärktem Maße wieder. Aliphatische und aromatische Amide bilden in indifferenten Lösungen oder auch in Alkohol bei der Einwirkung von Natrium, Natriumamid oder auch Natriumäthylat Natriumverbindungen. Diese Alkalisalze der Amide werden aber, ebenso wie die Säuresalze, von Wasser gespalten. In verdünnten Alkalien sind die Amide ebensowenig löslich wie in verdünnten Säuren; sie verhalten sich also gegen wässerige Lösungen wie neutrale Substanzen. Andererseits sind aber die Amide imstande, auch mit anderen Metallen, wie Silber, Quecksilber u. a. Salze zu liefern, von denen die Quecksilbersalze sogar gegen Wasser beständig sind und durch Auflösen von Quecksilberoxyd in wässerigen Amidlösungen entstehen.

Tautomerie der Säureamide. Die Konstitution der Metallsalze steht noch nicht sicher fest. Die Annahme, daß das Metall für ein am Stickstoff stehendes Wasserstoffatom eingetreten ist

$$X.C\begin{matrix}\nearrow O \\ \searrow N\begin{matrix}\nearrow H \\ \searrow Me\end{matrix}\end{matrix}$$

wird dadurch gestützt, daß die Natriumverbindungen beim Erhitzen mit Halogenalkylen die entsprechenden Alkylderivate liefern, deren Alkyl sicher am Stickstoff steht, da sie auch aus Alkylamin und Säurechlorid entstehen. Dieser Annahme steht aber die Tatsache gegenüber, daß die Silbersalze der Amide mit Halogenalkylen bei gewöhnlicher Temperatur Iminoäther $X.C\begin{matrix}\nearrow OAlk \\ \searrow NH\end{matrix}$ (s. S. 283) liefern, deren Alkyl sicher am Sauerstoff steht. Dies bedingt für die Silbersalze die Formel

$$X.C\begin{matrix}\nearrow OMe \\ \searrow NH.\end{matrix}$$

Das bei den Natriumsalzen gewonnene Ergebnis ist sehr wahrscheinlich auf eine unter dem Einfluß der Hitze vor sich gehende Umlagerung der vielleicht primär entstehenden O-Alkylderivate zurückzuführen. Ob aber alle Metallsalze das Metallatom am Sauerstoff gebunden haben oder ob vielleicht die Salze verschiedener Metalle verschieden konstituiert sind, läßt sich noch nicht mit Sicherheit entscheiden. Nach dem Gesagten und nach einigen anderen Reaktionen muß man annehmen, daß die Säureamide zu den tautomeren Substanzen gehören und je nach den Bedingungen entsprechend den beiden Formeln

$$X.C\begin{matrix}\nearrow O \\ \searrow NH_2\end{matrix} \rightleftarrows X.C\begin{matrix}\nearrow OH \\ \searrow NH\end{matrix}$$

reagieren können. Für die freien Amide nimmt man jetzt — namentlich nach dem physikalisch-chemischen Verhalten — mit Bestimmtheit die erste Formel, d. h. normale Säureamidstruktur an, abgesehen davon, daß man alle tautomeren Körper als Gleichgewichtsgemische der beiden möglichen Formen auffassen kann. Die tautomere Form existiert anscheinend nur in Derivaten (s. Iminoäther S. 283; vgl. ferner den Artikel „Isomerie“).

In den primären Säureamiden kann man auch ein Wasserstoffatom der Aminogruppe durch Brom ersetzen. Die entstehenden Bromamide

$$X.C\begin{matrix}\nearrow O \\ \searrow NHBr\end{matrix}$$

lösen sich schon in wässerigen Alkalien zu Salzen der tautomeren Form

$$X.C\begin{matrix}\nearrow OMe \\ \searrow NBr\end{matrix}$$

und spielen bei dem früher (S. 273) beschriebenen Abbau der Säureamide zu Alkylaminen eine wichtige Rolle.

Ein Charakteristikum der Säureamide ist ihre „Verseifbarkeit“, d. h. die Eigenschaft durch hydrolysierende Agen-

tien gespalten zu werden. Im Gegensatz zu den Alkylaminen, in denen die Alkylgruppen außerordentlich fest am Stickstoff haften, zerfallen die Säureamide oft schon beim Erhitzen mit Wasser, fast immer aber mit Säuren oder Alkalien unter Wasseraufnahme in die betreffende organische Säure und Ammoniak oder Alkylamin

$$CH_3.CONH_2 + H_2O = CH_3.COOH + NH_3$$

Doch gibt es auch schwer verseifbare Amide. Die Verseifung der alkylierten Amide ist von Bedeutung für die Darstellung der Amine (s. S. 271 und 272).

Gegen salpetrige Säure verhalten sich die primären Amide ebenso wie die primären aliphatischen Amine, indem die Aminogruppe unter Stickstoffentwicklung in die Hydroxylgruppe übergeführt wird

$$C_6H_5.CO.NH_2 + ONOH = C_6H_5.COOH + N_2 + H_2O$$

Auf diese Weise lassen sich auch die sonst schwer verseifbaren primären Säureamide in die zugehörigen Säuren überführen.

Unter dem Einfluß wasserentziehender Mittel, wie Phosphorsäureanhydrid, spalten die Amide Wasser ab und liefern Nitrile (s. S. 284)

$$CH_3.CONH_2 \rightarrow CH_3.C\equiv N + H_2O.$$

Diese Reaktion bildet die Umkehrung der oben (S. 277) erwähnten Darstellung der Amide aus den Nitrilen.

Durch Reduktion, die meist am besten mit Natrium und Amylalkohol ausgeführt wird, lassen sich Säureamide oft recht gut in Amine überführen (vgl. S. 272)

$$CH_3.CO.NH_2 + 4H = CH_3.CH_2.NH_2 + H_2O$$

Der Abbau der primären Säureamide mit Brom und Alkalilauge ist schon als Amindarstellung besprochen worden (s. S. 273).

Durch Einwirkung von Phosphorpentachlorid auf Säureamide entstehen durch Eintritt von zwei Chloratomen für den Sauerstoff sogenannte Amidchloride

$$X.CO.NH_2 \rightarrow X.CCl_2.NH_2$$

Sie sind nur beständig, wenn ein oder beide Wasserstoffatome der Aminogruppe durch Alkyl ersetzt sind. Sie verlieren leicht Chlorwasserstoff und gehen in Imidchloride über (s. S. 283).

Die Schmelzpunkte (Fp.) und Siedepunkte (Sdp.) einiger wichtiger Amide gibt folgende Zusammenstellung:

Amide	Form-		Acet-		Benz-	
	Fp.	Sdp.	Fp.	Sdp.	Fp.	Sdp.
Primär	—1°	210°	82°	223°	128°	—
Sekundär	—	—	78°	223°	148°	—
Tertiär	—	—	79°	—	208°	—
Methylamid	fl.	180°	28°	206°	78°	—
Anilid	46°	284°	115°	304°	163°	—

Von den zweibasischen Säuren leiten sich natürlich Diamide und Monamide, die sogenannten Amidsäuren oder auch Aminsäuren, ab. Das Diamid der Kohlensäure ist der Harnstoff $CO\langle^{NH_2}_{NH_2}$, das Monamid die Carbaminsäure $CO\langle^{NH_2}_{OH}$, die nicht in freiem Zustande, wohl aber in Form von Estern (Urethanen) bekannt ist. Die Harnstoffe und Urethane entstehen namentlich aus Isocyansäure (s. S. 281) und Isocyansäureestern mit Ammoniak oder Aminen und Alkoholen

$$O:C:NX + NH_2Y = O:C\begin{matrix}NHX\\NHY\end{matrix}$$

$$O:C:NX + HOY = O:C\begin{matrix}NHX\\OY\end{matrix}$$

Sie entstehen auch aus Phosgen (Kohlensäurechlorid) in üblicher Weise (vgl. den Artikel „Kohlensäurederivate“).

γ) Iminbasen. Wie schon in der Einleitung erwähnt, bezeichnet man zwar auch die gewöhnlichen sekundären Amine, über die im vorhergehenden alles Nötige gesagt ist, als Iminbasen oder Imidbasen, doch versteht man im besonderen unter diesem Namen solche Verbindungen, in denen die NH-Gruppe nicht zwei verschiedene Komplexe verbindet, sondern mit ihren beiden Affinitäten am gleichen organischen Komplex haftet. Von derartigen Verbindungen kann man zwei verschiedene Gruppen unterscheiden, je nachdem die beiden Wertigkeiten der NH-Gruppe mit zwei verschiedenen oder mit einem und demselben Kohlenstoffatom verknüpft sind.

Die erste Gruppe umfaßt die schon erwähnten zyklischen „Imine“ (s. S. 275). Die wichtigsten derselben, die eine Kette von 3, 4 oder 5 Kohlenstoffen enthalten, Trimethylenimin, Tetramethylenimin oder Pyrrolidin und Pentamethylenimin oder Piperidin entstehen aus den Chlorhydraten der entsprechenden Diamine durch Erhitzen

$$\begin{matrix}CH_2-CH_2-NH_2,\ HCl\\ |\\ CH_2-CH_2-NH_2,\ HCl\end{matrix} \rightarrow$$

Tetramethylendiamin

$$\begin{matrix}CH_2-CH_2\\ |\\ CH_2-CH_2\end{matrix}\rangle NH,\ HCl + NH_4Cl$$

Pyrrolidin

Diamine mit längerer Kohlenstoffkette zerfallen in komplizierterer Weise und die ihnen entsprechenden Imine sind noch nicht mit Sicherheit bekannt. Aethylendiamin liefert auf diese Weise ein bimolekulares Diimin, das Piperazin oder Diäthylendiimin

$$2H_2N.CH_2.CH_2.NH_2 \rightarrow NH\langle\begin{matrix}CH_2-CH_2\\CH_2-CH_2\end{matrix}\rangle NH$$

doch hat sich auch das einfache Aethy-

lenimin durch Bromwasserstoffabspaltung aus dem Bromäthylamin gewinnen lassen

$$\begin{matrix} CH_2-Br \\ | \\ CH_2-NH_2 \end{matrix} \rightarrow \begin{matrix} CH_2 \\ | \\ CH_2 \end{matrix}\!\!>NH + HBr$$

Entsprechend dieser Methode lassen sich auch die anderen Imine darstellen.

Die Imine sind basische Flüssigkeiten, von denen namentlich das Pyrrolidin und Piperidin als Grundkörper „heterozyklischer Verbindungen" wichtig sind. Sie werden bei diesen ausführlicher behandelt (vgl. den Artikel „Heterozyklische Verbindungen"). Die niedrigeren Glieder sind sehr unbeständig und werden z. B. von Halogenwasserstoffsäuren schon wieder aufgespaltet.

Die zweite Gruppe von Iminbasen sind solche, in denen die Imidogruppe doppelt an ein Kohlenstoffatom gebunden ist. Man kann sie als Aldehyde (oder Ketone) auffassen, in denen das Sauerstoffatom durch die Imidogruppe ersetzt worden ist oder als Ammoniak, in dem für zwei Wasserstoffatome eine zweiwertige Alkylidengruppe, d. h. der Rest eines Aldehyds (oder Ketons) eingetreten ist, welchen beiden Auffassungen auch ihre Bildung entspricht, doch kennt man bisher nur die den Aldehyden, nicht aber die den Ketonen entsprechenden Iminderivate. Man bezeichnet sie daher auch als Aldimide oder Aldime. Sie enthalten alle die sogenannte Azomethingruppe $-CH=N-$. Die Aldime entstehen aus Aldehyden und Ammoniak. Diese beiden Körper addieren sich zunächst zu den sogenannten Aldehydammoniaken (s. S. 276), die leicht wieder in ihre Bestandteile zerfallen oder unter Wasserabspaltung in die Aldimide übergehen. Letztere polymerisieren sich aber in der Regel sofort zu komplizierten Verbindungen, deren Konstitution sehr verschieden ist und auf die hier nur ganz kurz eingegangen werden kann.

Aus den aliphatischen Aldehyden, mit Ausnahme des ganz anders reagierenden Formaldehyds, entstehen anscheinend Trialkyltrimethylentriamine

$$Alph.CH:O + NH_3 \rightarrow Alph.CH\!<\!\begin{matrix} OH \\ NH_2 \end{matrix} \rightarrow$$

Aldehydammoniak

$$[Alp.CH:NH + H_2O] \rightarrow$$

Aldimid

$$\begin{matrix} Alph.CH - NH - CH.Alph \\ | \qquad\qquad\qquad | \\ NH - CH(Alph) - NH \end{matrix}$$

Trialkyltrimethylentriamin

Beim Benzaldehyd entsteht mit Ammoniak zunächst das sogenannte Hydrobenzamid, indem sich zwei Moleküle des Aldimids mit einem weiteren Aldehydmolekül kondensieren, doch läßt sich hier indirekt das Chlorhydrat des eigentlichen Benzaldimids (Benzylidenimids) als sehr unbeständige Substanz isolieren

$$C_6H_5CH\!<\!\begin{matrix} N:CH.C_6H_5 \\ N:CH.C_6H_5 \end{matrix} + 2C_2H_5OH$$

Hydrobenzamid

$$= C_6H_5.CH(OC_2H_5)_2 + 2C_6H_5.CH:NH$$

Benzaldimid

Sind also die Aldimide sehr unbeständige Körper, so lassen sich doch leicht Derivate von ihnen darstellen, in denen das Imidwasserstoffatom durch eine Alkylgruppe ersetzt ist. Diese alkylierten Aldimide werden auch häufig als „Schiff'sche Basen" bezeichnet. Zwar neigen auch hier die von den aliphatischen Aldehyden abgeleiteten Derivate sehr zur Polymerisation. Dagegen sind die Derivate der aromatischen Aldehyde wohl charakterisierte, meist gut kristallisierende Körper, die häufig zum Nachweis und zur Isolierung der Aldehyde oder der Amine benutzt werden und von verdünnten Säuren leicht wieder in ihre Komponenten gespaltet werden. Sie entstehen glatt aus aromatischen Aldehyden und primären Basen unter Wasseraustritt

$$C_6H_5.CHO + H_2N.C_6H_5 =$$
$$C_6H_5.CH:N.C_6H_5 + H_2O$$

Benzalanilin

Besonders häufig sind die unter Anwendung von Anilin erhältlichen „Schiffschen Basen", die sogenannten „Anile", untersucht worden.

Von Interesse ist es, daß gewisse Dialkylchloramine (s. S. 276) durch Chlorwasserstoffabspaltung in Schiff'sche Basen übergeführt werden können, was für die Konstitutionsbestimmung sekundärer Basen wichtig ist

$$\begin{matrix} X.CH_2 \\ Y \end{matrix}\!\!>NCl \rightarrow \begin{matrix} X.CH \\ Y \end{matrix}\!\!>N \rightarrow \begin{matrix} X.CHO + \\ Y.NH_2 \end{matrix}$$

Mit sekundären Basen und mit Säureamiden reagieren Aldehyde so, daß ein Aldehydmolekül sich mit zwei Molekülen des Ammoniakderivats kondensiert. Hierbei entstehen Diimide, Derivate der in freiem Zustande nicht beständigen gem-Diamine (s. S. 275)

$$CH_3.CHO + 2H_2N.CO.CH_3 =$$
$$CH_3.CH\!<\!\begin{matrix} NH.CO.CH_3 \\ NH.CO.CH_3 \end{matrix} + H_2O$$

Daß Ketone mit Ammoniak im allgemeinen keine entsprechenden Imine liefern, ist schon gesagt worden. So liefert Aceton mit Ammoniak die komplizierteren Basen Diacetonamin und Triacetonamin.

Nur gewisse substituierte aromatische Ketone bilden mit Ammoniak einfache Imine, so das sogenannte Michlersche Keton (pp-Tetramethyldiaminobenzophenon). Das Chlorhydrat dieses Imids $[(CH_3)_2NC_6N_4]_2C:NH$ ist der unter dem Namen Auramin bekannte Farbstoff. Auch „Schiff'sche Basen", d. h. alkylierte Imine sind von aliphatischen und fettaromatischen Ketonen bisher nicht erhalten worden. Wohl aber bilden aromatische Ketone mit primären

Aminen entsprechende Kondensationsprodukte. So entsteht aus Benzophenon und Anilin das sogenannte Benzophenonanil

$$(C_6H_5)_2C:O + H_2NC_6H_5 = (C_6H_5)_2C:N.C_6H_5 + H_2O$$

Das entsprechende „Anil" des Michlerschen Ketons wird als Phenylauramin bezeichnet. Diese und andere „Auraminbasen" werden bei den Farbstoffen näher behandelt.

Auch vom Chinon, das man ja als Diketon von der Formel

$$O:C\begin{matrix}\diagup CH = CH \diagdown \\ \diagdown CH = CH \diagup\end{matrix}C:O$$

auffaßt, sind ein Monoanilid und ein Dianilid bekannt, die aber auf andere Weise gewonnen werden, weil bei der direkten Einwirkung von Anilin auf Chinon nicht nur Kondensation, sondern daneben auch Addition von Anilin an die Kohlenstoffdoppelbindungen eintritt. Zu den derartig entstehenden Körpern gehören die Azophenine, die in engem Zusammenhang mit den Indulin-Farbstoffen stehen. Auch andere Farbstoffe, wie die Indophenole und Indamine und das wichtige Anilinschwarz sind Chinonimid-Derivate (vgl. den Artikel „Farbstoffe").

δ) Säureimide, Lactame, Iminoäther, Imidchloride und Amidine. Als Säureimide bezeichnet man im allgemeinen nicht die gewöhnlichen sekundären Amide, sondern nur die ringförmigen Derivate zweibasischer Säuren, in denen also die Imidogruppe die Brücke zwischen zwei demselben organischen Komplex angehörigen Carbonylgruppen bildet. Wie bei allen zyklischen Verbindungen entstehen auch bei den Imiden diejenigen mit besonderer Leichtigkeit, deren Ring aus im ganzen 5 oder 6 Gliedern besteht. Von den aliphatischen Dicarbonsäuren bilden also diejenigen Imide, deren Carboxylgruppen durch 2 oder 3 Kohlenstoffatome getrennt sind; von den aromatischen bilden nur die o-Dicarbonsäuren, d. h. Phtalsäure und Homophtalsäure Imide. Von den stereoisomeren Aethylendicarbonsäuren bilden nur die vom Typus der Maleinsäure, nicht aber die vom Typus der Fumarsäure Imide. Imide höherer oder niedrigerer Dicarbonsäuren sind nicht bekannt. Das sogenannte Oxalimid ist wahrscheinlich bimolekular. Eine Ausnahmestellung nimmt wie immer die Kohlensäure ein (s. S. 282).

Die Darstellung der Säureimide geschieht entweder durch Erhitzen der Anhydride mit Ammoniak

$$C_6H_4\begin{matrix}\diagup CO \diagdown \\ \diagdown CO \diagup\end{matrix}O + NH_3 = C_6H_4\begin{matrix}\diagup CO \diagdown \\ \diagdown CO \diagup\end{matrix}NH + H_2O$$

oder aus den Ammoniumsalzen und den daraus zunächst entstehenden Monamiden oder Diamiden beim Erhitzen

$$\begin{matrix}CH_2.COOH,\ NH_3 \\ | \\ CH_2.COOH,\ NH_3\end{matrix} \xrightarrow{-2H_2O} \begin{matrix}CH_2.CONH_2 \\ \\ CH_2.CONH_2\end{matrix}$$

Bernsteinsaures Ammonium — Succinamid

$$\xrightarrow{-NH_3} \begin{matrix}CH_2.CO \diagdown \\ CH_2.CO \diagup\end{matrix}NH$$

Succinimid

$$\begin{matrix}CH_2.COOH,\ NH_3 \\ CH_2.COOH\end{matrix} \longrightarrow \begin{matrix}CH_2.CONH_2 \\ CH_2.COOH\end{matrix} \longrightarrow \begin{matrix}CH_2.CO \diagdown \\ CH_2.CO \diagup\end{matrix}NH$$

Analog entstehen unter Anwendung von Alkylaminen an Stelle des Ammoniaks substituierte Imide.

Eigenschaften der Säureimide. Die Säureimide sind feste, kristallinische, meist unzersetzt sublimierbare Substanzen. Die basische Natur des Ammoniakrestes ist in ihnen wie in allen sekundären Säureamiden völlig verschwunden und hat einem ausgesprochen sauren Charakter Platz gemacht. Die Imide bilden beständige Metallsalze, in denen gewöhnlich der Imidwasserstoff als durch Metall vertreten angenommen wird, für deren Konstitution aber das bei den Amiden (S. 278) Gesagte gilt. Wichtig ist namentlich das Phtalimidkalium wegen seiner Verwendbarkeit für die Darstellung primärer Amine (s. S. 271). Aus dem dort Gesagten geht schon hervor, daß das Imidwasserstoffatom auch leicht durch Alkylreste ersetzt werden kann. Beim Erhitzen mit Alkalien oder Säuren werden die Imide ebenso wie die Amide verseift. Als Zwischenstufe entstehen hierbei die Monamide

$$C_6H_4\begin{matrix}\diagup CO \diagdown \\ \diagdown CO \diagup\end{matrix}O \xrightarrow{H_2O} C_6H_4\begin{matrix}\diagup CONH_2 \\ \diagdown COOH\end{matrix}$$

Phtalimid — Phtalaminsäure

$$\xrightarrow{H_2O} C_6H_4\begin{matrix}\diagup COOH \\ \diagdown COOH\end{matrix} + NH_3$$

Phtalsäure

Von besonderem Interesse ist der Zusammenhang der Imide mit wichtigen heterozyklischen Verbindungen, der aus folgenden Formeln hervorgeht:

$$\begin{matrix}CH_2-CO \diagdown \\ | \qquad\quad NH \\ CH_2-CO \diagup\end{matrix} \qquad \begin{matrix}CH-CO \diagdown \\ \| \qquad\quad NH \\ CH-CO \diagup\end{matrix} \qquad \begin{matrix}CH=CH \diagdown \\ | \qquad\quad NH \\ CH=CH \diagup\end{matrix}$$

Succinimid — Maleïnimid — Pyrrol

$$\begin{matrix} & CH_2 & \\ CH_2 & & CH_2 \\ | & & | \\ CO & & CO \\ & NH & \end{matrix} \qquad \begin{matrix} & CH & \\ CH_2 & & CH \\ | & & | \\ CO & & CO \\ & NH & \end{matrix} \qquad \begin{matrix} & CH & \\ CH & & CH \\ | & & | \\ CH & & CH \\ & N & \end{matrix}$$

Glutarimid — Glutakonimid — Pyridin

Homophtalimid — Isochinolin

Als das Imid der Kohlensäure ist die Isocyansäure (vgl. S. 286) aufzufassen,

$$CO\genfrac{}{}{0pt}{}{OH}{OH} \rightarrow CO:NH$$

deren Ester als substituierte Imide bei der Verseifung in normaler Weise primäre Amine liefern (s. S. 272). Entsprechend sind die Isothiocyansäure oder Rhodanwasserstoffsäure (vgl. S. 286) und ihre Ester, die Senföle, als Imide der Thiokohlensäure anzusehen. Durch Aufnahme von Ammoniak oder von primären und sekundären Aminen gehen alle diese Imide wieder in Diamide, d. h. Harnstoffe (S. 279) über. Auf Grund dieser Reaktion werden Kaliumisocyanat und Phenylisocyanat als Reagentien auf Amine benutzt.

Laktame. Eine besondere Gruppe von Iminoverbindungen, die eine Mittelstellung zwischen Iminbasen und Säureimiden einnimmt, bilden die inneren Anhydride der Aminosäuren, die sogenannten Laktame, in denen die Imidogruppe an zwei Kohlenstoffatome desselben Kohlenstoffkomplexes gebunden ist, der aber nach der einen Seite hin den Charakter eines Alkyls, nach der anderen Seite hin den Charakter eines Säurerestes hat.

Die wichtigste Bildungsweise der Laktame ist die intramolekulare Wasserabspaltung aus Aminosäuren. Wie immer bei Ringschlüssen entstehen auch hier mit besonderer Leichtigkeit fünf- und sechsgliedrige Ringe, d. h. die γ- und δ-Aminosäuren sind in erster Linie zur Laktambildung geneigt. Die Siebenringbildung aus ε-Aminosäuren geht schon bedeutend weniger glatt vor sich und andere Laktame können nach dieser Methode überhaupt nicht erhalten werden, doch entstehen sieben- und achtgliedrige Laktamringe nach einer anderen noch zu besprechenden Methode. Laktame mit weniger als fünf Ringgliedern sind nicht bekannt. Das früher als Laktam der o-Aminobenzoesäure (Anthranilsäure) $C_6H_4\langle\genfrac{}{}{0pt}{}{CO}{NH}$ angesehene Anthranil ist jetzt mit großer Wahrscheinlichkeit als anders konstituiert erkannt worden (s. S. 297). Die γ- und δ-Laktame entstehen durch Erhitzen der γ- und δ-Aminosäuren auf ihren Schmelzpunkt

$$CH_2\langle\genfrac{}{}{0pt}{}{CH_2.NH_2}{CH_2.COOH} \rightarrow CH_2\langle\genfrac{}{}{0pt}{}{CH_2.NH}{CH_2.CO} + H_2O$$

γ-Aminobuttersäure — γ-Butyrolaktam Pyrrolidon.

o-Aminohydrozimtsäure $\rightarrow$ Hydrocarbostyril $+ H_2O$

Auch ungesättigte Aminosäuren entsprechender Konstitution bilden Laktame. So liefert die o-Aminozimmtsäure zwar nicht beim Erhitzen für sich, wohl aber mit Salzsäure oder Schwefelsäure Carbostyril. Alle die so entstehenden γ- und δ-Laktame stehen in naher Beziehung zu wichtigen heterozyklischen Verbindungen und werden daher bei diesen ausführlicher behandelt.

Diese Zusammengehörigkeit zeigt folgende Zusammenstellung:

Laktam der	Heterozyklischer Grundkörper
γ-Aminobuttersäure	Pyrrol
δ-Aminovaleriansäure	Pyridin
o-Aminophenylessigsäure	Indol
o-Aminomandelsäure	Indol
o-Aminobenzoylameisensäure	Indol
o-Aminohydrozimmtsäure	Chinolin
o-Aminozimmtsäure	Chinolin
Aminoäthyl-o-Benzoesäure	Isochinolin

Eine zweite Darstellungsmethode für aliphatische Laktame, die dadurch wichtig ist, daß sie auch zu sieben- und achtgliedrigen Laktamringen führt, beruht auf einer der sogenannten Beckmannschen Umlagerung (s. S. 297) analogen Umlagerung der Oxime zyklischer Ketone bei Gegenwart von konzentrierter Schwefelsäure

$$\begin{matrix}CH_2-CH_2-CH_2\\CH_2\quad CH_2\quad CH_2\end{matrix}\rangle C{=}NOH \rightarrow$$

Cykloheptanonoxim, Suberonoxim

$$\begin{matrix}CH_2 & CH_2-CH_2 & CO\\ | & & |\\ CH_2 & -CH_2-CH_2 & -NH\end{matrix}$$

ζ-Heptolaktam.

Auch durch Reduktion von Säureimiden entstehen Laktame, so liefert Succinimid (s. S. 281) bei der elektrolytischen Reduktion glatt γ-Butyrolaktam und analog entsteht aus Phtalimid Phtalimidin, das Laktam der Benzylamin-o-carbonsäure

$$C_6H_4\langle\genfrac{}{}{0pt}{}{CO}{CO}\rangle NH \rightarrow C_6H_4\langle\genfrac{}{}{0pt}{}{CH_2}{CO}\rangle NH$$

Manche aromatische Laktame entstehen am besten aus den betreffenden Laktonen,

den inneren Anhydriden der Oxysäuren, mit Ammoniak, wobei das sogenannte Brückensauerstoffatom durch die Imidogruppe ersetzt wird

$$C_6H_4\langle{}^{CO}_{CH_2}\rangle O \rightarrow C_6H_4\langle{}^{CO}_{CH_2}\rangle NH$$

Phtalid Phtalimidin

$$C_6H_4\langle{}^{CH=CH}_{CO-O} \rightarrow C_6H_4\langle{}^{CH=CH}_{CO-NH}$$

Isocumarin Isocarbostyril

Die Laktame sind meist kristallinische, unzersetzt destillierbare Körper. Entsprechend dem allgemeinen Verhalten der Amine und Säureamide werden sie durch verdünnte Säuren oder Alkalien zwischen CO- und NH-Gruppe gespaltet, d. h. sie gehen bei der Verseifung in Aminosäuren über

$$\begin{matrix}CH_2 - CO \\ CH_2 - CH_2\end{matrix}\rangle NH \longrightarrow \begin{matrix}CH_2 - COOH \\ CH_2 - CH_2 - NH_2\end{matrix}$$

Iminoäther. Ebenso wie man durch Ersatz des Sauerstoffatoms in den Aldehyden die Aldehydimide (s. S. 280) erhält, kann man sich aus den Säuren Imidoderivate abgeleitet denken

$$X.C\langle{}^{O}_{OH} \longrightarrow X.C\langle{}^{NH}_{OH}$$

die man als *Imidsäuren* bezeichnen müßte. Diesen Formeln entsprechen die tautomeren Formen der Säureamide (s. S. 278), die, wie dort erwähnt, nicht in freiem Zustande, wohl aber in Form von Metallsalzen existieren. Außerdem kennt man aber Alkyläther dieser Formen, die sogenannten *Iminoäther* oder auch Imidoäther (s. S. 278), die man auch als Säureester ansehen kann, in denen der Carbonylsauerstoff durch die Imidogruppe ersetzt ist.

Die Iminoäther werden ganz allgemein in Form ihrer Chlorhydrate erhalten, wenn man auf Säurenitrile (s. S. 284) wasserfreien Alkohol und trockenes Chlorwasserstoffgas einwirken läßt

$$CH_3.C\vdots N + C_2H_5OH + HCl$$

Acetonitril

$$= CH_3.C\langle{}^{NH,\ HCl}_{OC_2H_5}$$

Acetiminoäthylätherchlorhydrat

Aromatische Iminoäther hat man auch aus den Silbersalzen der Säureamide mit Halogenalkyl erhalten (vgl. S. 278).

$$C_6H_5.C\langle{}^{NH_2}_{O} \longrightarrow C_6H_5.C\langle{}^{NH}_{OAg}$$
$$\longrightarrow C_6H_5.C\langle{}^{NH}_{OC_2H_5}$$

Die Chlorhydrate der Iminoäther sind kristallinische Körper, die mit Wasser in Säureester und Salmiak

$$CH_3.C\langle{}^{NH,\ HCl}_{OC_2H_5} + H_2O = CH_3.C\langle{}^{O}_{OC_2H_5} + NH_3, HCl$$

durch einfaches Erhitzen in Säureamid und Halogenalkyl zerfallen

$$C_6H_5.C\langle{}^{NH,\ HCl}_{OC_2H_5} = C_6H_5.C\langle{}^{NH_2}_{O} + C_2H_5Cl$$

Die freien Iminoäther sind eigentümlich riechende, unzersetzt siedende Flüssigkeiten, die mit Ammoniak oder mit Aminen *Amidine* liefern (s. unten).

Völlig analog den Iminoäthern entstehen durch Addition von Merkaptanen und Chlorwasserstoff die Chlorhydrate von *Iminothioäthern* oder *Thioiminoäthern*

$$CH_3.C\vdots N + C_6H_5SH = CH_3.C\langle{}^{NH}_{SC_6H_5}$$

Acetiminothiophenyläther

In ihrer Konstitution den Iminoäthern analog sind die sogenannten *Imidchloride*

$$X.C\langle{}^{NH}_{Cl}$$

und die entsprechenden Bromide und Jodide. Sie entstehen aus den Nitrilen durch Addition von Chlorwasserstoff

$$X.C\vdots N + HCl = X.C\langle{}^{NH}_{Cl}$$

oder auch aus den Säureamiden mit Phosphorpentachlorid, wobei als Zwischenprodukte Amidchloride (s. S. 279) gebildet werden

$$X.C\langle{}^{NH_2}_{O} \longrightarrow X.C\langle{}^{NH_2}_{\begin{matrix}Cl\\Cl\end{matrix}} \longrightarrow X.C\langle{}^{NH}_{Cl} + HCl$$

Die Imidchloride sind unbeständig und gehen unter Verlust des Chlorwasserstoffs leicht wieder in die Nitrile über. Beständiger sind die aus einigen monoalkylierten aromatischen Amiden mit Phosphorpentachlorid erhältlichen, am Stickstoff alkylierten Imidchloride. Mit Wasser liefern die Imidchloride wieder Säureamide und mit Ammoniak oder primären und sekundären Aminen Amidine.

Amidine kann man als Säureamide betrachten, deren Sauerstoffatom durch die Iminogruppe ersetzt ist

$$X.C\langle{}^{NH_2}_{O} \rightarrow X.C\langle{}^{NH_2}_{NH.}$$

Sie sind also gleichzeitig Amino- und Iminoverbindungen.

Ihre Bildung aus Iminoäthern oder Imid-

chloriden mit Ammoniak oder primären und sekundären Aminen ist schon erwähnt worden

$$X.C\begin{matrix}\nearrow NH\\ \searrow OC_2H_5\end{matrix} + HN(R)_2 = X.C\begin{matrix}\nearrow NH\\ \searrow N(R)_2\end{matrix} + C_2H_5OH$$

$$X.C\begin{matrix}\nearrow NH\\ \searrow Cl\end{matrix} + HN(R)_2 = X.C\begin{matrix}\nearrow NH\\ \searrow N(R)_2\end{matrix} + HCl$$

Namentlich die erste dieser beiden Reaktionen wird als Darstellungsmethode benutzt. Die aliphatischen Amidine entstehen außerdem beim Erhitzen der Säureamide im Salzsäurestrom

$$2\,CH_3.CO.NH_2 \rightarrow CH_3.C\begin{matrix}\nearrow NH\\ \searrow NH_2\end{matrix} + CH_3.COOH$$

Die Amidine sind ziemlich starke einsäurige Basen und bilden gut kristallisierende, beständige Salze. In freiem Zustand sind die Amidine ziemlich unbeständig und zerfallen namentlich mit Wasser sofort in Ammoniak und die zugehörige Säure. Merkwürdig ist, daß die Amidine trotz ihrer Aminogruppe beständig gegen salpetrige Säure sind. Mit β-Ketosäureestern geben die Amidine Pyrimidinderivate (s. Artikel „Heterozyklische Verbindungen"). Als das Amidin der Kohlensäure ist das Guanidin $HN:C(NH_2)_2$ anzusehen.

Den zweibasischen Säuren entsprechen Diamidine, so der Bernsteinsäure das Succinamidin, das unter Ammoniakabspaltung leicht in ein Imidin übergeht

$$\begin{matrix}CH_2—C(:NH)NH_2\\ |\\ CH_2—C(:NH)NH_2\end{matrix} \rightarrow \begin{matrix}CH_2—C(:HH)\\ |\\ CH_2—C(:HH)\end{matrix}\!\!>HH$$

Succinamidin Succinimidin

ε) Nitrile und Isonitrile. Gemäß der in der Einleitung gegebenen Definition bezeichnet man als Nitrile oder auch Säurenitrile alle Verbindungen, welche die Gruppe $—C\vdots N$ enthalten. Wegen ihres nahen Zusammenhangs mit den Carbonsäuren, in die sie leicht übergeführt werden können, gehören sie zu den wichtigsten Verbindungen der organischen Chemie. Man benennt sie entweder als Cyanide der mit der CN-Gruppe verbundenen Gruppe, d. h. als Ester der Blausäure (S. 286) oder als Nitrile der aus ihnen durch Verseifung entstehenden Säure, die Verbindung $CH_3.CN$ also entweder als Methylcyanid oder als Acetonitril, d. h. Nitril der Essigsäure.

Die Bildungsweisen der Nitrile kann man in zwei Klassen teilen, je nachdem man entweder eine im Ausgangsmaterial schon vorhandene kohlenstoff- und stickstoffhaltige Gruppe in die CN-Gruppe umwandelt oder die CN-Gruppe als solche in das Molekül des Ausgangsmaterials einführt. Die zur ersten Klasse gehörigen Methoden sind für aliphatische und aromatische Nitrile in gleicher Weise brauchbar, während sich bei der Einführung der CN-Gruppe die bei allen Austauschreaktionen immer wiederkehrenden Unterschiede geltend machen.

Die wichtigste Umwandlungsreaktion, die zur Entstehung einer CN-Gruppe führt, ist die Wasserabspaltung aus den Säureamiden, die schon bei diesen erwähnt worden ist (S. 279). Da die Säureamide ihrerseits durch Wasserabspaltung aus den Ammoniumsalzen der Carbonsäuren entstehen (s. S. 277), liegt in dieser Methode die Möglichkeit, die Carboxylgruppe COOH in die Cyangruppe umzuwandeln, d. h. jede Carbonsäure in das zugehörige Nitril überzuführen. Als wasserentziehendes Mittel wendet man meist Phosphorsäureanhydrid an.

$$CH_3.CONH_2 \rightarrow CH_3.CN + H_2O$$

Auf derselben Reaktion beruht die direkte Gewinnung der Nitrile bei der Destillation der Carbonsäuren mit Rhodankalium oder Rhodanblei, wobei primär die Säureamide entstehen.

$$C_6H_5.COOH + HNCS \rightarrow C_6H_5.CONH_2 + COS \rightarrow C_6H_5.CN + CO_2 + H_2S$$

Sehr wichtig ist auch die Gewinnung der Nitrile aus den Aldoximen (s. S. 297) durch Wasserabspaltung, die gewöhnlich durch Erhitzen mit Essigsäureanhydrid bewirkt wird, und die Ueberführung der Aldehyde in Nitrile erlaubt.

$$C_6H_5.CH:CH.CH:NOH \rightarrow$$
Oxim des Zimtaldehyds.
$$C_6H_5.CH:CH.CN + H_2O$$
Zimtsäurenitril.

Außerdem lagern sich die weiter unten (S. 287) zu besprechenden Isonitrile beim Erhitzen auf höhere Temperatur in Nitrile um

$$C_2H_5.N:C \rightarrow C_2H_5.C\vdots N.$$
Aethylisocyanid Propionitril

Schließlich entstehen Nitrile auch bei der Einwirkung von Brom und Alkalilauge auf primäre Amine, doch verläuft diese Reaktion nur bei primären aliphatischen Aminen mit mehr als fünf Kohlenstoffatomen einigermaßen glatt. Bei dieser Reaktion entstehen in erster Phase Dibromamine (vgl. S. 276), die dann unter dem Einfluß des Alkalis Bromwasserstoff abspalten

$$\text{I}\quad X.CH_2.NH_2 + 2Br_2 = X.CH_2.NBr_2 + 2HBr$$

$$\text{II}\quad X.CH_2.NBr_2 = X.C\vdots N + 2HBr.$$

Da die primären Amine aus den um ein Kohlenstoff reicheren Säureamiden ebenfalls bei der Einwirkung von Brom und Alkalilauge entstehen (s. S. 273), so kann man auch — wenigstens in den höheren Reihen —

die Säureamide direkt in die um ein Kohlenstoff ärmeren Nitrile überführen

$$X.CH_2.CO.NH_2 \rightarrow X.CH_2.NH_2 \rightarrow X.C{:}N$$

Praktische Bedeutung hat diese Methode kaum.

Bei den Reaktionen, die die Einführung einer Cyangruppe in einen organischen Komplex ermöglichen, zeigt sich wie gewöhnlich (s. S. 272), daß Halogenatome im allgemeinen nur in aliphatischer Bindung gegen andere Gruppen austauschbar sind. In der aliphatischen Reihe ist aber die Einführung der Cyangruppe für ein Halogenatom ganz allgemein durchführbar und bildet die wichtigste Methode zur Darstellung der verschiedensten aliphatischen Nitrile sowie eine der wichtigsten kernsynthetischen Methoden überhaupt, indem sie den Aufbau nicht nur der Carbonsäuren, sondern auch der verschiedensten anderen Körperklassen vermittelt (vgl. S. 272). Die Reaktion wird in der Praxis gewöhnlich so ausgeführt, daß man das betreffende Halogenalkyl in wässerig-alkoholischer Lösung auf Cyankalium einwirken läßt

$$C_2H_5Br + KCN = C_2H_5.CN + KBr$$

Bei dieser Reaktion entstehen als Nebenprodukte Isonitrile (s. S. 287) und zwar im allgemeinen um so mehr, je niedriger die Reaktionstemperatur gehalten wird. Dieselben können durch Schütteln mit verdünnter Salzsäure leicht zerstört werden. Es möge hier auch schon erwähnt werden, daß Cyansilber mit Halogenalkylen als Hauptprodukt Isonitrile liefert. An Stelle der Halogenalkyle kann man bei der Nitrildarstellung auch die Aetherschwefelsäuren verwenden, deren Alkalisalze man mit Cyankalium destilliert

$$C_2H_5O.SO_2OK + KCN = C_2H_5.CN + K_2SO_4.$$

Während die vorstehende Methode zur Gewinnung von aromatischen Nitrilen nicht geeignet ist (obwohl Chlorbenzol mit Metallcyaniden bei hoher Temperatur etwas Benzonitril liefert), kann man zu diesem Zweck die Sulfosäuren benutzen, deren Alkalisalze beim Schmelzen mit Cyankalium oder Ferrocyankalium Nitrile liefern

$$C_6H_5.SO_2.OK + KCN = C_6H_5.CN + K_2SO_3$$

Ungleich wichtiger als diese Methode ist aber die Einführung der Cyangruppe in aromatische Kerne durch Austausch für eine NH_2-Gruppe vermittels der Sandmeyerschen Reaktion. Diese Reaktion beruht darauf, daß man das primäre aromatische Amin in Form seines Chlorhydrats mit salpetriger Säure „diazotiert" und das entstandene Diazoniumchlorid mit einer Lösung von Kaliumkupfercyanür umsetzt

$$\begin{matrix} C_6H_5 \\ Cl.NH_3 \end{matrix} \xrightarrow{HNO_2} \begin{matrix} C_6H_5 \\ | \\ Cl.N = N \end{matrix} \xrightarrow{KCN} \left[\begin{matrix} C_6H_5 & CN \\ | & | \\ N & -\!\!-\, N \end{matrix}\right]$$

$$\longrightarrow C_6H_5.CN + N_2$$

Wegen des Verlaufs dieser wichtigen Reaktion muß auf den Artikel „Azokörper" verwiesen werden. Nach dieser Methode werden weitaus die meisten aromatischen Nitrile gewonnen.

Eine viel gebrauchte Methode zur Darstellung komplizierterer Nitrile beruht auf der Fähigkeit der Blausäure (s. S. 286), sich an ungesättigte Verbindungen zu addieren. Namentlich Aldehyde und Ketone lagern mit Leichtigkeit unter Lösung der C=O-Doppelbindung Blausäure an

$$C_6H_5.C\begin{matrix} /\!\!/ O \\ \diagdown H \end{matrix} + HCN = C_6H_5.C\begin{matrix} \diagup OH \\ - CN \\ \diagdown H \end{matrix}$$

Die entstehenden „Cyanhydrine" sind die Nitrile von Oxysäuren, in welch letztere sie durch Verseifung überzuführen sind. Auch an eine Doppelbindung zwischen zwei Kohlenstoffen läßt sich Blausäure addieren, wenn die Doppelbindung einer CO-Gruppe benachbart steht. So entstehen aus ungesättigten Säuren und Ketonen Nitrilcarbonsäuren oder Ketonitrile.

Eigenschaften der Nitrile. Die Nitrile sind flüssige, in den höheren Reihen auch kristallinische, meist unzersetzt destillierbare Verbindungen. Sie sind farblos, im Wasser meist unlöslich, besitzen einen nicht unangenehmen aetherischen Geruch und sind, mit Ausnahme der äußerst giftigen Blausäure, schwache Gifte. Sie reagieren im allgemeinen neutral, zeigen aber in mancher Hinsicht die Eigenschaften sehr schwacher Basen. Auch hierin bildet der als schwache Säure (Blausäure) reagierende Cyanwasserstoff eine Ausnahme.

Die Siedepunkte und Schmelzpunkte einiger wichtiger Nitrile zeigt folgende Zusammenstellung:

Nitrile	Fp.	Sdp.
Cyanwasserstoff	—15°	26,5°
Methylcyanid	—44°	81,5°
Aethylcyanid	—103°	98 °
n-Propylcyanid	—	116 °
Isopropylcyanid	—	107 °
Phenylcyanid	—13°	191 °
Benzylcyanid	—	232 °

Das chemische Verhalten der Nitrile beruht in erster Linie auf der Additionsfähigkeit der ungesättigten Gruppe C≡N. So addieren die Nitrile bei der sogenannten „Verseifung" Wasser, indem sie zunächst in Säureamide und dann in die Ammoniumsalze der Säuren übergehen (s. S. 277, 279). Diese Reaktion, sowie die Addition von Wasserstoff (Mendiussche Reaktion S. 272), Halogenwasserstoff, Alkohol (S. 283), organischen Säuren und Säureanhydriden (S. 277) sind schon früher erwähnt worden. In analoger Weise werden Schwefelwasserstoff (S

277), Merkaptane (S. 283), Hydroxylamin (S. 299), Hydrazin und andere Verbindungen addiert. Wichtig ist noch die Addition von metallorganischen Verbindungen an Nitrile, die zu einer Synthese von Ketonen führt.

Blausäure. Eine Sonderstellung unter den Nitrilen nimmt, wie schon erwähnt, in gewisser Beziehung der Cyanwasserstoff oder die Blausäure ein. Diese Verbindung kann man als das Nitril der Ameisensäure definieren, in welche Blausäure bei der „Verseifung" in der Tat übergeht. Der Cyanwasserstoff ist im Gegensatz zu den übrigen Nitrilen eine schwache Säure, d. h. sein Wasserstoffatom ist unter Bildung ziemlich beständiger Salze durch Metalle ersetzbar.

Konstitution der Blausäure und ihrer Salze. Die verschiedenen Metallsalze der Blausäure sind vielleicht nicht gleichartig konstituiert, denn während Cyankalium mit Halogenalkylen hauptsächlich Nitrile gibt, liefert Cyansilber bei der gleichen Umsetzung Isonitrile. Hieraus kann man auf folgende beiden Konstitutionsformeln schließen

K—C ⋮ N	Ag—N=C
Cyankalium	Cyansilber

Ob diese Folgerung aber richtig ist, erscheint sehr zweifelhaft, vielmehr ist es nicht unwahrscheinlich, daß alle Salze der Blausäure die den Isonitrilen entsprechende Konstitution

$$Me—N=C$$

besitzen, und daß die Nitrilbildung aus dem Kaliumsalz als eine Sekundärreaktion anzusehen ist, d. h. daß primär auch hier Isonitrile entstehen, die sich dann unter dem Einfluß der Hitze in Nitrile umlagern. Trotzdem muß man für die freie Blausäure mit ziemlicher Bestimmtheit die Nitrilformel H.C⋮N annehmen, obwohl in neuerer Zeit auch für sie die Isonitrilformel H.N:C in Betracht gezogen worden ist. Die Mehrzahl der Reaktionen der freien Blausäure ist jedoch nur mit der Nitrilformel vereinbar, so der Uebergang in Ameisensäure bei der Wasseraufnahme, die Bildung von Methylamin bei der Reduktion und die Bildung von Acetonitril bei der Behandlung mit Diazomethan. Die Blausäure gehört also anscheinend zu den tautomeren Substanzen, d. h. sie reagiert bei den meisten Umsetzungen nach der Formel H.C⋮N, bei der Salzbildung aber nach der Isonitrilformel H.N:C. Ob letztere in der vorstehenden Weise oder als H.N⋮C zu schreiben ist, soll noch bei den Isonitrilen (S. 287) erörtert werden.

Bildungsweisen der Blausäure. Die Sonderstellung der Blausäure unter den Nitrilen bedingt auch einige spezielle Bildungsweisen. Außer nach den allgemeinen Methoden, d. h. durch Wasserabspaltung aus Formamid und aus Formaldoxim, entsteht Blausäure noch aus Gemischen von Acetylen und Stickstoff oder von Cyan und Wasserstoff unter dem Einfluß elektrischer Entladungen und aus Chloroform und Ammoniak beim Erhitzen

$$H.CCl_3 + H_3N = H.CN + 3HCl.$$

Technisch wichtig ist die Bildung von Cyaniden beim Erhitzen stickstoffhaltiger organischer Substanzen (tierischer Abfälle usw.) mit Alkali und die Bildung von Blausäure bei der trockenen Destillation der Steinkohlen, das heißt bei der Fabrikation von Leuchtgas.

Von den Umsetzungen der Blausäure, die im allgemeinen die für ein Nitril normalen sind, ist noch erwähnenswert ihre Fähigkeit sich an ungesättigten Verbindungen zu addieren (s. S. 285), was für die organische Synthese wichtig ist. Beim Schmelzen an der Luft oder mit Schwefel nimmt Cyankalium Sauerstoff oder Schwefel auf und bildet Salze der Isocyansäure oder Cyansäure und der Rhodanwasserstoffsäure (vgl. S. 282 und 287). Alles Nähere über Cyanide findet sich in dem Artikel „Cyanverbindungen".

Das natürliche Vorkommen der freien Blausäure beschränkt sich auf einige wenige Pflanzen, in denen sie sich aber zum Teil in beträchtlicher Menge vorfindet, so in dem javanischen Baum Pangium edule Reinw. Außerdem kommt sie in Form eines sogenannten Glukosids, des Amygdalins in den bitteren Mandeln und Kirschlorbeerblättern vor. Das Amygdalin zerfällt leicht unter Wasseraufnahme in Blausäure, Benzaldehyd und Traubenzucker. Nitrile finden sich in dem sogenannten Tieröl, dem Produkt der trockenen Destillation von Knochen, wobei sie durch Einwirkung von Ammoniak auf Fettsäuren entstehen (vgl. S. 284).

Nitrile mehrbasischer Säuren. Es versteht sich von selbst, daß man nach den üblichen Methoden auch Verbindungen darstellen kann, die gleichzeitig mehrere Cyangruppen enthalten: die Nitrile mehrbasischer Säuren.

Als das Nitril der Oxalsäure ist das freie Cyan oder richtiger Dicyan NC — CN anzusehen. Es wird wird aus Kupfervitriol und Cyankalium dargestellt, indem das primär entstehende Kupfercyanid in Kupfercyanür und Dicyan zerfällt. Es entsteht auch in normaler Weise aus dem Amid der Oxalsäure.

Die Schmelzpunkte und Siedepunkte einiger wichtiger Dinitrile gibt die Zusammenstellung auf Seite 287.

Von denselben mehrbasischen Säuren leiten sich natürlich auch sogenannte Nitrilsäuren oder Halbnitrile ab, Verbindungen, die Nitril- und Carboxylgruppe nebeneinander enthalten und analog darstellbar sind.

Dinitrile	Schmelzpunkt	Siedepunkt
Oxalsäurenitril	— 34 ⁰	— 21⁰
Malonsäurenitril	+ 30 ⁰	+ 218⁰
Bernsteinsäurenitril	+ 54,5⁰	+ 266⁰
Glutarsäurenitril	— 29 ⁰	+ 286⁰
o-Phtalsäurenitril	+ 141 ⁰	—
m- „	+ 161 ⁰	—
p- „	+ 219 ⁰	—

Als Halbnitril der Kohlensäure kann man die Cyansäure $C\begin{matrix}\diagup OH \\ \diagdown\!\!\diagdown\!\!\diagdown N\end{matrix}$ auffassen. Ob übrigens die sogenannte Cyansäure, eine sich äußerst leicht polymerisierende, nur unter 0⁰ beständige Flüssigkeit, wirklich dieser Formel entspricht oder Isocyansäure O=C=NH (s. S. 282) ist, läßt sich vorläufig nicht entscheiden. Dasselbe gilt von dem sogenannten Kaliumcyanat, das durch Schmelzen von Cyankalium an der Luft gewonnen wird (s. S. 286). Ester der normalen Cyansäure sind nicht mit Sicherheit bekannt. Sie entstehen jedoch anscheinend aus Natriumalkoholaten und Chlorcyan Cl.C≡N, dem Chloridnitril der Kohlensäure. Technisches Interesse besitzt das Cyanamid $C\begin{matrix}\diagup NH_2, \\ \diagdown\!\!\diagdown\!\!\diagdown N\end{matrix}$ das Amidnitril der Kohlensäure. Sein Calciumsalz, der sogenannte Kalkstickstoff wird durch Glühen von Calciumcarbid oder von einem Gemisch von Kalk und Kohle in einer Stickstoffatmosphäre dargestellt und als Kunstdünger verwendet, weil es mit Wasser langsam in Calciumcarbonat und Ammoniak übergeht. Seine Gewinnung bedeutet eine Nutzbarmachung des atmosphärischen Stickstoffs.

Isonitrile, Isocyanide oder auch Carbylamine, nennt man die den Nitrilen isomeren Verbindungen, in denen aber, wie aus den Umsetzungen zweifellos hervorgeht, die Alkylgruppe an Stickstoff gebunden ist. Die Isonitrile haben also die Konstitution AlkNC, d. h. man kann sie als Ester der tautomeren Form der Blausäure (S. 286) auffassen, wobei es zunächst zweifelhaft ist, ob man bei diesen Verbindungen fünfwertigen Stickstoff Alk—N≡C oder zweiwertigen Kohlenstoff Alk—N=C oder gar zwei freie Valenzen Alk—N=C< annehmen soll (vgl. S. 286). Die letzte Annahme läßt sich mit unseren augenblicklichen Anschauungen über die Chemie des Kohlenstoffs schwer vereinigen, da man ziemlich allgemein annimmt, daß Verbindungen mit freien Valenzen nicht existieren können. Sie wird daher kaum angewandt. Zwischen den beiden anderen Formeln läßt sich nach dem jetzigen Stand der Wissenschaft nicht mit Bestimmtheit entscheiden. Gegen die früher allgemein angenommene Formel Alk—N≡C lassen sich verschiedene Einwände erheben, so der, daß es in anderen Fällen bisher niemals gelungen ist, Derivate des fünfwertigen Stickstoffs zu erzeugen, in denen alle fünf Stickstoffvalenzen an Kohlenstoff gebunden sind. Man neigt daher in neuerer Zeit mehr dazu, der zuerst von Nef vertretenen Formel Alk—N=C den Vorzug zu geben, zumal sich die Existenzmöglichkeit des zweiwertigen Kohlenstoffs angesichts des Kohlenoxyds nicht leugnen läßt. Die Nefsche Formel dürfte also wohl zur Zeit von der Mehrzahl der Chemiker als die beste angesehen werden.

Die Darstellung der Isonitrile geschieht durch Einwirkung von Jodalkylen auf Cyansilber (vgl. S. 285 und 286). Hierbei entsteht zunächst eine Doppelverbindung von Cyansilber und Isonitril

$C_2H_5.J + 2AgNC = C_2H_5NC,AgNC + AgJ$

die durch Destillation mit Cyankalium zersetzt wird

$$C_2H_5NC,AgNC + KCN = C_2H_5NC + AgNC, KCN.$$

Als Nebenprodukte entstehen die Isonitrile, wie erwähnt, auch bei der Einwirkung der Jodalkyle oder alkylschwefelsauren Salze auf Cyankalium (s. S. 285). Natürlich entstehen nach dieser Methode nur aliphatische Isonitrile.

Ganz allgemein erhält man Isonitrile aus primären Aminen beim Erwärmen mit Chloroform und Kalilauge (vgl. S. 274)

$$C_6H_5.NH_2 + CHCl_3 + 3KOH = C_6H_5.N{:}C + 3KCl + 3H_2O.$$

Nach der Ansicht von Nef, für deren Richtigkeit manches spricht, entsteht hierbei primär aus dem Chloroform durch Chlorwasserstoffabspaltung „Dichlormethylen“

$$CHCl_3 + KOH = CCl_2 + KCl + H_2O$$

das dann weiter mit dem Amin reagiert

$$C_6H_5.NH_2 + Cl_2C + 2KOH = C_6H_5.N{:}C + 2KCl + 2H_2O$$

Eigenschaften der Isonitrile. Die Isonitrile sind farblose, meist unzersetzt destillierbare Flüssigkeiten von außerordentlich widerwärtigem Geruch. Sie sind in Wasser wenig löslich

Isonitrile	Sdp.
Methylisocyanid	59⁰
Aethylisocyanid	79⁰
n-Propylisocyanid	98⁰
Phenylisocyanid	165⁰

Beim Erhitzen lagern sie sich in Nitrile um. Die Umlagerungstemperatur liegt für Aethylisonitril bei etwa 230 bis 250⁰. Sie sind vermöge ihrer ungesättigten Natur befähigt, die verschiedensten Elemente und Verbindungen zu addieren und sind infolgedessen äußerst reaktionsfähig. Nur gegen Alkalien und Alkoholate sind sie sehr beständig. Mit ver-

dünnten Säuren zerfallen sie sehr leicht, mit Wasser bei höherer Temperatur in primäre Amine und Ameisensäure

$$X.N:C + 2H_2O \rightarrow \left[X.N:C{\genfrac{}{}{0pt}{}{H}{OH}} + H_2O\right] \rightarrow X.NH_2 + O:C{\genfrac{}{}{0pt}{}{H}{OH}}$$

indem als Zwischenprodukt ein Alkylformamid entsteht. Analog wird Schwefelwasserstoff bei 100° glatt zu einem Alkylthioformamid addiert

$$Alk.N:C + H_2S \rightarrow Alk.N:C{\genfrac{}{}{0pt}{}{H}{SH}} \rightarrow Alk.NH.C{\genfrac{}{}{0pt}{}{H}{S}}$$

Ebenso addieren die Isonitrile Chlor zu Alkyliminokohlensäurechloriden (I), Schwefel zu Senfölen (II) und Sauerstoff (beim Behandeln mit Quecksilberoxyd) zu Isocyansäureestern (III) (vgl. S. 281 und 282).

$$Alk.N{=}C \rightarrow \begin{cases} Alk.N{=}CCl_2 & (I) \\ Alk.N{=}C{=}S & (II) \\ Alk.N{=}C{=}O & (III) \end{cases}$$

Auch Halogenwasserstoff wird von den Isonitrilen addiert. Hierbei entsteht ein alkyliertes Formimidchlorid in Form eines Chlorhydrats.

$$Alk.N:C \rightarrow Alk.N:C{\genfrac{}{}{0pt}{}{H}{Cl}} \rightarrow \left(Alk.N:C{\genfrac{}{}{0pt}{}{H}{Cl}}\right)_2 HCl$$

Dasselbe wurde früher für ein Chlorhydrat des Isonitrils selbst und letzteres infolgedessen für eine Base gehalten, woher der Name „Carbylamin" rührt.

Mit naszierendem Wasserstoff liefern die Isonitrile sekundäre Amine (Methylalkylamine)

$$Alk.N:C + 4H = Alk.NH.CH_3$$

Hieraus wie aus der Spaltung mit verdünnten Säuren folgt, daß in den Isonitrilen der Alkylrest am Stickstoff, bei den Nitrilen (vgl. S. 285) aber am Kohlenstoff steht. Betrachtet man die Blausäure (s. S. 286) als tautomere Substanz, so sind die Nitrile deren C-Aether, die Isonitrile deren N-Aether. Auch als alkylierte Imide (vgl. S. 280) des Kohlenoxyds kann man die Isonitrile auffassen, wenn man das Kohlenoxyd gewissermaßen als einfachsten Aldehyd betrachtet (vgl. S. 299).

η) Ringförmige Ammoniakderivate. Von den ringförmigen Ammoniakderivaten sind die Imine (S. 279), Säureimide (S. 281) und Laktame (S. 282) schon im Anschluß an die offenen Ammoniakderivate behandelt worden.

Dort ist auch auf ihren Zusammenhang mit wichtigen „heterozyklischen Verbindungen" wie Pyrrol, Pyridin, Piperazin, Indol, Chinolin und Isochinolin hingewiesen worden. Andere heterozyklische Verbindungen wie die Imidazole, Aldehydine, Chinoxaline, Azimide und Phenazine sind wenigstens kurz erwähnt worden. Alle diese Körper werden in dem Artikel „Heterozyklische Verbindungen" ausführlich besprochen.

Schließlich könnte man zu den ringförmigen Ammoniakderivaten noch die Abkömmlinge der Stickstoffwasserstoffsäure, die Azide und Diazoimide rechnen (vgl. S. 268). Von diesen Körpern wird im Artikel „Azokörper" noch eingehender die Rede sein.

2 b) Derivate des Hydroxylamins. a) Hydroxylaminbasen. Bei den Hydroxylaminbasen, die sich vom Hydroxylamin (s. S. 269) ebenso ableiten, wie die Aminbasen vom Ammoniak, treten, wie schon in der Einleitung erwähnt, Isomerien auf, die bei den Aminen naturgemäß nicht möglich sind. So existieren von den Monoalkylhydroxylaminen je zwei verschiedene Isomere

$$H-N{\genfrac{}{}{0pt}{}{H}{O\,Alk}} \qquad Alk-N{\genfrac{}{}{0pt}{}{H}{OH}}$$

α-Alkylhydroxylamin β-Alkylhydroxylamin

je nachdem die Alkylgruppe an den Sauerstoff oder an den Stickstoff getreten ist. Man bezeichnet sie als α- und β- oder auch als O- und N-Alkylhydroxylamine. Ebenso sind bei den Dialkylhydroxylaminen zwei Isomere möglich, nämlich die N,N- oder β,β-Derivate und die O,N- oder α,β-Derivate.

Trialkylhydroxylamine sind noch wenig bekannt, wohl aber kennt man Verbindungen vom Typus

$$\genfrac{}{}{0pt}{}{Alk}{\genfrac{}{}{0pt}{}{Alk}{Alk}}\!>\!N\!<\!\genfrac{}{}{0pt}{}{O\,Alk}{Hal}$$

die man als Halogenalkylate dieser Trialkylhydroxylamine auffassen kann. Man bezeichnet sie als Trialkylalkoxylammoniumsalze. Außerdem kennt man sogenannte Trialkylaminoxyde

$$(Alk)_3{>}N = O$$

die Anhydride der den Ammoniumhydroxyden entsprechenden Trialkylhydroxylammoniumhydroxyde

$$(Alk)_3{>}N{<}\genfrac{}{}{0pt}{}{OH}{OH}$$

Bei der direkten Einführung von Alkylresten in das Hydroxylamin entstehen nur β- oder N-Derivate.

Die Darstellung der α- oder O-Alkylhydroxylamine (Alkoxylamine) muß daher auf einem Umwege geschehen, indem man Derivate des Hydroxylamins alkyliert, in denen die beiden N-Wasserstoffatome durch einen leicht wieder abspaltbaren Rest geschützt sind. Hierfür geeignet sind Hydroxamsäuren (s. S. 290) und Oxime (s. S. 293). Letztere bilden übrigens zwei Reihen von Alkylderivaten —O- und N-Aether (s. S. 293 und 296) und dienen daher zur Gewinnung beider Arten

von Alkylhydroxylaminen. Das beste Ausgangsmaterial für die Darstellung der O-Alkylhydroxylamine ist die Benzhydroxamsäure. So gewinnt man O-Aethylhydroxylamin, indem man aus dem Kaliumsalz der Benzhydroxamsäure mit Jodäthyl den Aethylester darstellt

$$C_6H_5.C\langle^{NOK}_{OH} + C_2H_5J = C_6H_5.C\langle^{NOC_2H_5}_{OH}$$

und diesen mit verdünnten Säuren spaltet

$$C_6H_5.C\langle^{NOC_2H_5}_{OH} + H_2O = C_6H_5.C\langle^{OH}_{O} + H_2NOC_2H_6$$

Aehnlich erhält man O-Methyl- und O-Benzylhydroxylamin, indem man Antibenzaldoxim oder Acetoxim mit Natriumalkoholat und Methyljodid oder Benzychlorid in die entsprechenden O-Aether überführt

$$C_6H_5.CH:NOH + KOH + CH_3J = C_6H_5.CH:NOCH_3 + H_2O + KJ$$

und diese mit Salzsäure spaltet

$$C_6H_5.CH:NOCH_3 + H_2O = C_6H_5.CHO + H_2NOCH_3$$

Da die Alkylierung von Hydroxylaminderivaten die einzige bisher bekannte Methode zur Gewinnung von O-Alkylhydroxylaminen ist, hat man aromatische O-Alkylhydroxylamine noch nicht erhalten können.

Für die Darstellung der β- oder N-Alkylhydroxylamine kommen hauptsächlich zwei Methoden in Betracht. Da die direkte Alkylierung des Hydroxylamins im wesentlichen zu Dialkylhydroxylaminen führt, muß man auch hier von Derivaten des Hydroxylamins ausgehen. Das geeignetste Ausgangsmaterial ist wiederum das Benzaldoxim, dessen Synform bei der Alkylierung neben den vorher erwähnten O-Alkylverbindungen hauptsächlich isomere N-Alkylderivate liefert (vgl. S. 294 und 296).

$$C_6H_5.CH:NOH \rightarrow C_6H_5.CH\langle^{NH}_{O}| \rightarrow C_6H_5.CH\langle^{NAlph}_{O}|$$

Durch Spaltung dieser N-alkylierten Oxime mit Salzsäure erhält man die N-Alkylhydroxylamine

$$C_6H_5.CH\langle^{N.Alk}_{O}| + H_2O = C_6H_5.CH:O + HN\langle^{Alk}_{OH}$$

Während diese Methode naturgemäß wieder nur aliphatische Hydroxylamine liefert, erhält man aliphatische und aromatische N-Alkylhydroxylamine durch Reduktion der Nitroverbindungen. Die Reduktion kann elektrolytisch oder durch Zinkstaub ausgeführt werden, muß aber in neutraler Lösung, am besten unter Zusatz eines Neutralsalzes wie Chlorcalcium geschehen

$$C_6H_5.NO_2 + 4H = C_6H_5.NHOH + H_2O$$

Außerdem entstehen N-Alkylhydroxylamine noch bei der Behandlung der O,N-Dialkylhydroxylamine mit Salzsäure (s. S. 290)

$$HN\langle^{C_2H_5}_{OCH_2.C_6H_5} + H_2O = HN\langle^{C_2H_5}_{OH} + C_6H_5.CH_2OH$$

und schließlich bei der Oxydation primärer Amine mit Sulfomonopersäure („Caroscher Säure"). Da diese Oxydation aber außerordentlich leicht weiter zu Oximen (s. S. 296) und noch höheren Oxydationsprodukten (s. S. 291) führt, läßt sie sich praktisch nur verwerten, wenn es sich um das primäre Amin eines tertiären Kohlenwasserstoffradikals handelt

$$(CH_3)_3C.NH_2 + O = (CH_3)_3C.NHOH.$$

Schließlich addiert sich Hydroxylamin an die Olefindoppelbindungen von $\alpha\beta$-ungesättigten Ketonen und Carbonsäuren (vgl. S. 295). Die hierbei entstehenden Hydroxylaminoketone und Hydroxylaminocarbonsäuren sind auch als N-substituierte Hydroxylamine aufzufassen

$$C_6H_5.CH:CH.COOH \rightarrow C_6H_5.CH(N(H).OH).CH_2.COOH$$

N,N- oder $\beta\beta$-Dialkylhydroxylamine erhält man durch direkte Alkylierung des Hydroxylamins mit Jodalkylen oder auch bei der Oxydation sekundärer Amine mit Wasserstoffsuperoxyd. Sie entstehen auch aus Nitroparaffinen, Salpetrigsäureestern und Nitrosaminen mit Zinkäthyl und anderen metallorganischen Verbindungen.

O,N- oder $\alpha\beta$-Dialkylhydroxylamine entstehen bei der weiteren Alkylierung der vorher erwähnten O-Alkylhydroxylamine. Man kann auch die aus Chlorkohlensäureester und Hydroxylamin erhältliche Carbäthoxyhydroxamsäure alkylieren und den entstehenden Ester mit Salzsäure spalten

$$OC\langle^{OC_2H_5}_{N\langle^{H}_{OH}} \longrightarrow OC\langle^{OC_2H_5}_{N\langle^{Alk}_{OAlk}} \longrightarrow CO_2 + C_2H_5OH + HN\langle^{Alk}_{OAlk}$$

Eigenschaften der Alkylhydroxylamine. Die Alkylhydroxylamine sind niedrig schmelzende oder flüssige, meist unzersetzt flüchtige Verbindungen. Sie sind einsäurige Basen und verhalten sich bei der Salzbildung wie die Aminbasen. Phenylhydroxylamin und andere aromatische N-

Alkylhydroxylamine mit freier p-Stellung werden durch Mineralsäuren in p-Aminophenole umgelagert

$$H\langle C_6H_4\rangle-N\begin{matrix}H\\OH\end{matrix} \rightarrow HO\langle C_6H_4\rangle-N\begin{matrix}H\\H\end{matrix}$$

Ist die p-Stellung besetzt, so treten kompliziertere Umlagerungen ein. Die O,N-Dialkylhydroxylamine spalten beim Erhitzen mit Salzsäure die am O stehende Alkylgruppe ab, während die am N stehenden Alkylgruppen wie in den Aminen außerordentlich fest haften (s. S. 289). Bei der Reduktion liefern die am Stickstoff alkylierten Hydroxylamine die entsprechenden Aminbasen. Mit Ausnahme der NN-Dialkylderivate sind die Hydroxylamine gegen Oxydationsmittel namentlich in alkalischer Lösung sehr empfindlich. Sie werden durch Silberlösung, die N-Monoalkylhydroxylamine auch durch Fehlingsche Lösung leicht oxydiert. Phenylhydroxylamin liefert bei der Oxydation zunächst Nitrosobenzol, das aber mit noch unangegriffenem Phenylhydroxylamin leicht zu Azoxybenzol (s. Artikel „Azokörper") zusammentritt.

Die Schmelzpunkte und Siedepunkte einiger Alkylhydroxylamine finden sich in folgender Tabelle.

Alkylhydroxylamine	O-Mono		N-Mono		ON-Di		NN-Di	
	Fp.	Sdp.	Fp.	Sdp.	Fp.	Sdp.	Fp.	Sdp.
Methyl	—	—	41°	61° (16 mm)	fl.	42°	—	—
Aethyl	fl.	68°	59°	—	fl.	83°	fl.	47° (15 mm)
Phenyl	—	—	81°	—	—	—	—	—
Benzyl	fl.	123° (50 mm)	57°	—	fl.	—	123°	—

Die N-Monoalkylhydroxylamine liefern ähnlich wie sekundäre Amine N-Nitrosoderivate $\begin{matrix}Alk\\HO\end{matrix}>N-NO$, die aber sehr unbeständig sind und von denen mit Sicherheit nur das Phenylnitrosohydroxylamin und einige kompliziertere Analoga bekannt sind. Sowohl die O- als auch die N-Monoalkylhydroxylamine vereinigen sich mit Aldehyden zu O- bezw. N-Alkylderivaten der Oxime (vgl. S. 297)

$$X.CHO + H_2NOAlk = X.CH:NOAlk + H_2O$$

$$X.CHO + \begin{matrix}H\\HO\end{matrix}>N-Alk = X.CH\begin{matrix}N-Alk\\|\\O\end{matrix} + H_2O$$

Bei der Alkylierung des Hydroxylamins treten, wie erwähnt, die Alkylgruppen immer nur an den Stickstoff, während sich die OH-Gruppe auf diesem Wege scheinbar nicht alkylieren läßt. Durch weitere Behandlung der ON-Dialkylhydroxylamine mit Halogenalkyl muß man also zu Trialkylhydroxylaminen kommen können, doch ist von solchen bisher nur ein einziges, das Tribenzylhydroxylamin $(C_6H_5.CH_2)_2N.OCH_2.C_6H_5$ mit Sicherheit bekannt. Bei weiterer Behandlung der NN-Dialkylhydroxylamine mit Halogenalkylen tritt dagegen keine weitere Alkylierung, sondern nur Addition zu Trialkyloxyammoniumsalzen ein. So liefert NN-Diäthylhydroxylamin mit Jodäthyl Triäthyloxyammoniumjodid

$$\begin{matrix}C_2H_5\\C_2H_5\end{matrix}>N-OH \longrightarrow \begin{matrix}C_2H_5\\C_2H_5-\\C_2H_5\end{matrix}>N\begin{matrix}OH\\J\end{matrix}$$

Setzt man aus diesen Ammoniumsalzen mit feuchtem Silberoxyd die Hydroxylbasen in Freiheit, so verlieren dieselben H_2O und gehen in die sogenannten Trialkylamin-N-oxyde über

$$(C_2H_5)_3N\begin{matrix}OH\\J\end{matrix} \longrightarrow (C_2H_5)_3N\begin{matrix}OH\\OH\end{matrix} \longrightarrow (C_2H_5)_3N:O$$

die auch durch Oxydation tertiärer Amine mit Wasserstoffsuperoxyd entstehen (s. S. 274) und umgekehrt bei der Reduktion tertiäre Amine liefern. Die Oxyde sind kristallinische zum Teil zerfließliche Massen, die beständige Hydrate bilden. Die Trialkylamin-N-oxyde können noch ein weiteres Molekül Halogenalkyl addieren. Hierbei entstehen Trialkylalkoxylammoniumsalze

$$(CH_3)_3N:O + CH_3J = (CH_3)_3N\begin{matrix}OCH_3\\J\end{matrix}$$

die man auch als Halogenalkyladditionsprodukte (Halogenalkylate) der noch nicht bekannten N,N,O-Trialkylhydroxylamine ansehen kann.

β) Hydroxamsäuren. Denkt man sich im Hydroxylamin ein Wasserstoffatom durch einen Säurerest ersetzt, so sind zunächst, wie bei den Alkylhydroxylaminen, zwei isomere Verbindungen möglich, je nachdem die Acylgruppe am Stickstoff oder am Sauerstoff haftet

$$H-N\begin{matrix}Ac\\OH\end{matrix} \quad H-N\begin{matrix}H\\OAc.\end{matrix}$$

Da man jedoch die den *α*-Alkylhydroxylaminen (s. S. 288) entsprechenden O-Acidyl-

derivate noch nicht kennt, wird hier nur von den N-Acidylhydroxylaminen die Rede sein, doch soll gleich erwähnt werden, daß O, N-Diacidylhydroxylamine bekannt sind. Auch Triacidylhydroxylamine scheinen zu existieren.

Die N-Acidylhydroxylamine $X.CO.N\langle{}^{H}_{OH}$ entsprechen vollkommen den Säureamiden (vgl. S. 276) und können auch als Säureoxyamide bezeichnet werden. Diese Säureoxyamide können ebenso wie die Säureamide im Sinne zweier tautomerer Formen (vgl. S. 278) konstituiert sein

$$X.C\langle{}^{O}_{N\langle{}^{H}_{OH}} \rightleftarrows X.C\langle{}^{OH}_{N-OH}$$

Hydroxamsäure Hydroximsäure

Von diesen bezeichnet man die der gewöhnlichen Säureamidformel entsprechende Form als Hydroxamsäure, die der Imidsäureformel (s. S. 283) entsprechende Form als Hydroximsäure. Welche von diesen beiden Konstitutionen den nur in einer Form bekannten Säureoxyamiden wirklich zukommt, darüber gehen, wie bei den Säureamiden, die Meinungen auseinander, doch neigt man, im Gegensatz zu der bei den Säureamiden herrschenden Ansicht, hier mehr dazu, die Hydroximsäureformel für die richtige zu halten. Trotzdem bezeichnet man die Verbindungen gewöhnlich nicht als Hydroximsäuren, sondern als Hydroxamsäuren. Aber auch hiervon abgesehen ist die Bezeichnung als Hydroxam- oder Hydroximsäure deshalb nicht sehr glücklich gewählt, weil die einfachen aliphatischen „Hydroxamsäuren" gar keine Säuren, sondern neutral reagierende Verbindungen sind. Die Säurenatur tritt erst bei den aromatischen Hydroxamsäuren und bei der Oxalhydroxamsäure infolge des acidifizierenden Einflusses der benachbarten Phenyl- (s. S. 270) oder Carbonylgruppe hervor.

Die Darstellung der Hydroxamsäuren geschieht am bequemsten durch Behandlung der Säureester mit freiem Hydroxylamin in alkoholischer Lösung

$$CH_3.C\langle{}^{O}_{OC_2H_5} + HNHOH = CH_3.C\langle{}^{O}_{NHOH} + C_2H_5OH.$$

Acethydroxamsäure

An Stelle der Ester kann man auch die Amide oder Chloride der Säuren mit Hydroxylamin umsetzen.

Hydroxamsäuren entstehen auch, wenn man die weiter unten besprochenen O, N-Diacylderivate des Hydroxylamins mit überschüssigem Alkali behandelt

$$NH\langle{}^{CO.C_6H_5}_{O.CO.C_6H_5} + H_2O = HN\langle{}^{CO.C_6H_5}_{OH} + C_6H_5.COOH.$$

Dibenzhydroxamsäure Benzhydroxamsäure

Außerdem entstehen Hydroxamsäuren aus Aldehyden durch Einwirkung des Natriumsalzes des Nitrohydroxylamins (s. S. 269)

$$CH_3.C\langle{}^{O}_{H} + NO_2.NHOH = CH_3.C\langle{}^{O}_{NHOH} + HNO_2$$

Da die Hydroxamsäuren durch die Eisenchloridreaktion (s. unten) leicht zu erkennen sind, benutzt man diese Reaktion zum Nachweis der Aldehyde. Ebenso wie Nitrohydroxylamin wirkt auch Benzolsulfonhydroxamsäure. Schließlich entstehen Hydroxamsäuren auch, wenn man Aldoxime oder primäre Amine (vgl. S. 289) vom Typus $X.CH_2.NH_2$ mit Sulfomonopersäure oxydiert

$$X.CH_2.NH_2 \xrightarrow{2O} X.CH{:}NOH + H_2O \xrightarrow{O} X.C\langle{}^{OH}_{NOH}$$

Eigenschaften der Hydroxamsäuren. Die Hydroxamsäuren sind kristallinische Verbindungen, die sich beim Erhitzen über ihren Schmelzpunkt heftig zersetzen. Daß die einfachen aliphatischen Hydroxamsäuren nicht sauer reagieren, ist schon erwähnt worden, doch bilden alle Hydroxamsäuren Kupfersalze vom Typus $X.C\langle{}^{NO}_{O}\rangle Cu$. Besonders charakteristisch für die Hydroxamsäuren ist ihre Fähigkeit, mit Eisenchlorid tiefrote Färbungen oder Niederschläge, Ferrisalze, zu geben.

Tautomerie und Stereoisomerie der Hydroxamsäureester. Die sauer reagierende Benzhydroxamsäure läßt sich in der üblichen Weise in Alkylester oder -äther überführen. In diesen Aethern steht, wie sich aus der Spaltung (s. S. 289) mit voller Sicherheit ergibt, die Alkylgruppe an der Hydroxylaminhydroxylgruppe. Hiernach müssen diese Aether einer der beiden folgenden tautomeren Formeln entsprechen, zwischen denen sich wiederum nicht entscheiden läßt

$$C_6H_5.C\langle{}^{O}_{N\langle{}^{H}_{O.Alk}} \rightleftarrows C_6H_5.C\langle{}^{OH}_{NOAlk}$$

Andererseits lassen sich durch Spaltung der später (S. 292) zu besprechenden Aether der Dibenzhydroxamsäure, auch Aether der

Benzhydroxamsäure erhalten, in denen die Alkylgruppe an der am Kohlenstoff stehenden Hydroxylgruppe stehen muß

$$C_6H_5.C\begin{smallmatrix}\diagup OAlk\\ \diagdown\!\!\diagdown NOH\end{smallmatrix}$$

da sie auch aus Benziminoäthern (s. S. 283) mit Hydroxylaminchlorhydrat entstehen

$$C_6H_5.C\begin{smallmatrix}\diagup\!\!\diagup NH\\ \diagdown OAlk\end{smallmatrix} + NH_2OH = C_6H_5.C\begin{smallmatrix}\diagup\!\!\diagup NOH\\ \diagdown OAlk\end{smallmatrix} + NH_3$$

und bei der Spaltung Benzoesäureester und Hydroxylamin liefern. Diese Aether werden gewöhnlich als Alkylbenzhydroximsäuren bezeichnet. Die aus diesen Aethern durch weitere Alkylierung entstehenden Benzhydroximsäuredialkyläther

$$C_6H_5.C\begin{smallmatrix}\diagup OAlk\\ \diagdown\!\!\diagdown NOAlk\end{smallmatrix}$$ können keine Tautomerie mehr zeigen. Trotzdem existieren sie je in zwei verschiedenen Modifikationen, die demnach nicht desmotrope Formen, sondern Stereoisomere sein müssen. Diese Stereoisomerie wird bei den Oximen (S. 294) ausführlicher behandelt. Die beiden Formen der genannten Hydroximsäureäther werden als Syn- und Anti-Form, oder auch als α- und β-Form unterschieden im Sinne der Formeln

$$\begin{matrix}C_6H_5-C-O\,Alk\\ \|\\ HO-N\end{matrix} \quad \text{und} \quad \begin{matrix}C_6H_5-C-O\,Alk\\ \|\\ N-OH\end{matrix}$$

bezw.

$$\begin{matrix}C_6H_5-C-O\,Alk\\ \|\\ Alk\,O-N\end{matrix} \quad \text{und} \quad \begin{matrix}C_6H_5-C-O\,Alk\\ \|\\ N-N\,Alk\end{matrix}$$

Dementsprechend existiert die Oxaldihydroxamsäure oder richtiger Oxaldihydroximsäure in drei anscheinend stereoisomeren Formen

$$\begin{matrix}HO-C-C-OH\\ \|\quad\|\\ HO-N\;\;N-OH\end{matrix} \qquad \begin{matrix}HO-C\text{———}C-OH\\ \|\qquad\quad\|\\ HO-N\;\;HO-N\end{matrix}$$

$$\begin{matrix}HO-C\text{———————}C-OH\\ \|\qquad\qquad\|\\ N-OH\quad OH-N\end{matrix}$$

Diacylhydroxamsäuren. Außer den eben besprochenen N-Acylhydroxylaminen, den Hydroxamsäuren, kennt man mit Sicherheit nur noch N,O-Diacylderivate des Hydroxylamins, die man als Diacylhydroxamsäuren bezeichnen kann

$$H-N\begin{smallmatrix}\diagup CO.X\\ \diagdown O.CO.X\end{smallmatrix}$$

Auch für diese Säuren ist Tautomerie im Sinne der Formeln

$$X-C\begin{smallmatrix}\diagup\!\!\diagup O\\ \diagdown N\begin{smallmatrix}\diagup H\\ \diagdown OCO.X\end{smallmatrix}\end{smallmatrix} \rightleftarrows X-C\begin{smallmatrix}\diagup OH\\ \diagdown\!\!\diagdown N-OCO.X\end{smallmatrix}$$

möglich. Von diesen Formeln ist die zweite die wahrscheinlichere, d. h. die sogenannten Diacylhydroxamsäuren sind Säureester der Hydroximsäuren.

Die Diacylhydroxamsäuren entstehen bei weiterer Acylierung der Hydroxamsäuren oder direkt aus Hydroxylamin bei der Einwirkung von Säurechloriden oder -anhydriden. Dibenzhydroxamsäure

$$C_6H_5.C\begin{smallmatrix}\diagup OH\\ \diagdown\!\!\diagdown N.OCO.C_6H_5\end{smallmatrix}$$

wird gewöhnlich aus Hydroxylamin und Benzoylchlorid, Diacethydroxamsäure

$$CH_3.C\begin{smallmatrix}\diagup OH\\ \diagdown\!\!\diagdown N.OCO.CH_3\end{smallmatrix}$$

aus Hydroxylaminchlorhydrat durch Kochen mit Essigsäureanhydrid gewonnen.

Eine der Dibenzhydroxamsäure isomere Verbindung, die sogenannte Dibenzhydroximsäure entsteht aus Benzhydroximsäurechlorid (s. S. 299) und benzoesaurem Silber. Dieselbe ist jedoch von der Dibenzhydroxamsäure strukturverschieden und hat die Konstitution

$$C_6H_5.C\begin{smallmatrix}\diagup O.CO.CH_3\\ \diagdown\!\!\diagdown N.OH\end{smallmatrix}$$

ist also gar kein Dibenzoylhydroxylamin. Sie ist unbeständig und lagert sich freiwillig in Dibenzhydroxamsäure um.

Die Diacylhydroxamsäuren sind kristallinische Verbindungen, die stark sauer reagieren und Metallsalze liefern. Das Silbersalz der Dibenzhydroxamsäure liefert mit Jodäthyl nebeneinander zwei isomere Aethyläther, die beide sicher die Konstitution

$$C_6H_5.C\begin{smallmatrix}\diagup OC_2H_5\\ \diagdown\!\!\diagdown N.OCO.C_6H_5\end{smallmatrix}$$

besitzen, da sie bei der Spaltung Benzoesäureester, Benzoesäure und Hydroxylamin liefern. Diese beiden Aether müssen also wiederum stereoisomer im Sinne der Formeln

$$\begin{matrix}C_6H_5-C-OC_2H_5\\ \|\\ C_6H_5.COO.N\end{matrix} \quad \text{und} \quad \begin{matrix}C_6H_5-C-OC_2H_5\\ \|\\ N-OCO.C_6H_5\end{matrix}$$

sein. Mit überschüssigem Alkali spalten die Diacylhydroxamsäuren leicht den am Sauerstoff stehenden Acidylrest ab, gehen also in die gewöhnlichen Hydroxamsäuren über

$$X.C\begin{smallmatrix}\diagup OH\\ \diagdown\!\!\diagdown N.OCO.X\end{smallmatrix} + H_2O = X.C\begin{smallmatrix}\diagup OH\\ \diagdown\!\!\diagdown N.OH\end{smallmatrix} + X.COOH.$$

Eine eigenartige Umsetzung erleiden die Diacylhydroxamsäuren, wenn man ihre neutralen Alkalisalze in wässeriger Lösung stehen läßt. Sie liefern hierbei Kohlensäure, die entsprechende Carbonsäure und einen symmetrischen Dialkylharnstoff,

d. h. Diacethydroxamsäure liefert Essigsäure und symm-Dimethylharnstoff, Dibenzhydroxamsäure Benzoesäure und symm-Diphenylharnstoff usw. In analoger Reaktion liefern die Diacylhydroxamsäuren mit Ammoniak Monoalkylharnstoffe und mit Alkohol Alkylurethane (vgl. S. 279). Als Zwischenprodukt muß man bei allen diesen Umsetzungen Alkylisocyanat X.N:C:O annehmen, dessen Bildung sich unter Annahme einer der sogenannten Beckmannschen Umlagerung (s. S. 273 und 297) analogen Umlagerung deuten läßt

$$\begin{matrix} X & C-OH \\ & \| \\ X.COO & N \end{matrix} \longrightarrow \begin{matrix} X.COO-C & OH \\ \| & \\ X-N & \end{matrix}$$

Das Umlagerungsprodukt geht dann unter Abspaltung eines Moleküls Carbonsäure in Alkylisocyanat über.

$$\begin{matrix} XCOO & C-OH \\ & | \\ X-N & \end{matrix} \longrightarrow \left[\begin{matrix} HO-C-OH \\ \| \\ X-N \end{matrix}\right. +$$

$$\left.X.COOH\right] \longrightarrow \begin{matrix} C=O \\ \| \\ X-N \end{matrix} + X.COOH.$$

Schließlich möge erwähnt werden, daß bei der weiteren Benzoylierung der Dibenzhydroxamsäure das sogenannte Tribenzhydroxylamin entsteht. Dasselbe existiert in drei isomeren Modifikationen, deren Konstitution noch nicht aufgeklärt ist. Eine derselben stellt vielleicht ein Triacylhydroxylamin dar.

N,N-Diacylhydroxylamine mit zwei getrennten Säureresten sind nicht bekannt, wohl aber ringförmige Hydroxylaminderivate zweibasischer Säuren, denen man eine derartige Struktur zuerteilt. Sie entsprechen den Säureimiden (s. S. 281) und werden auch als N-Oxyimide bezeichnet. Sie entstehen aus den Monohydroxamsäuren durch Wasserabspaltung

$$\begin{matrix} CH_2.C\langle^{O}_{NHOH} \\ | \\ CH_2.C\langle^{OH}_{O} \end{matrix} = \begin{matrix} CH_2-C\diagup^{O} \\ | \quad\quad NOH \\ CH_2-C\diagdown_{O} \end{matrix} + H_2O$$

Succinmonohydroxamsäure — Succinylhydroxylamin

bei denselben Säuren, die auch zur Imidbildung befähigt sind. Natürlich leiten sich von zweibasischen Säuren auch Dihydroxamsäuren ab.

Die Schmelzpunkte einiger wichtiger Hydroxamsäuren (N-Monoacylhydroxylamine) und Diacylhydroxamsäuren (N,O-Diacylhydroxylamine) gibt folgende Zusammenstellung.

Hydroxamsäuren	N-Mono	N,O —Di
Formyl	81—82°	—
Acetyl	87—88°	89°
Benzoyl	124°	161°

γ) Oxime. Der als Aldimide oder Aldime bezeichneten Gruppe von Ammoniakderivaten (s. S. 280) entsprechen die ungleich wichtigeren und im Gegensatz zu der gewöhnlichen Iminen sehr beständigen Oxy-Imine oder Oxime als Hydroxylaminderivate. Man kann dieselben also auffassen als Aldehyde bzw. Ketone, in denen das Sauerstoffatom durch die Oximidogruppe ersetzt worden ist oder als Hydroxylamin in dem für die beiden am Stickstoff stehenden Wasserstoffatome eine zweiwertige Alkylidengruppe, d. h. der Rest eines Aldehyds oder Ketons eingetreten ist, d. h. als N,N-Alkylidenhydroxylamine. Im Gegensatz zu den Aldimen sind hier sowohl die Derivate der Aldehyde als auch diejenigen der Ketone ganz allgemein bekannt. Man unterscheidet danach Aldoxime und Ketoxime. Die Oxime sind von außerordentlicher Wichtigkeit für die Isolierung und Identifizierung der Aldehyde und Ketone.

Tautomerie der Oxime. Theoretisch könnte man neben den gewöhnlichen Oximen $^{X}_{Y}\!>\!C=N-OH$ noch eine zweite isomere Art von Oximen dadurch ableiten, daß man im Hydroxylamin nicht die beiden am Stickstoff stehenden Wasserstoffatome, sondern ein am Stickstoff stehendes und das am Sauerstoff stehende Wasserstoffatom durch die Alkylidengruppe ersetzt denkt. Diese N,O-Alkylidenhydroxylamine oder Isoxime (Isooxime)

$$\begin{matrix} X \\ Y \end{matrix}\!>\!C\!<\!\begin{matrix} NH \\ | \\ O \end{matrix}$$

scheinen als solche nicht zu existieren, ebensowenig wie man die tautomeren Form der Oxime

$$\begin{matrix} X \\ Y \end{matrix}\!>\!C-N\!\begin{matrix} \diagup\!\!\diagup O \\ \diagdown H \end{matrix}$$

kennt. Zwar kommen manche Oxime in zwei isomeren Formen vor, doch handelt es sich hier offenbar nicht um Isomerie oder Tautomerie, sondern um Stereoisomerie. Hiervon wird gleich noch ausführlicher die Rede sein. Für die bekannten Oxime kann man aus ihrer Fähigkeit, mit Alkalien Salze zu bilden, schließen, daß sie eine Hydroxylgruppe besitzen, also die Konstitution

$$^{X}_{Y}\!>\!C=N-OH$$

haben. Dem entspricht die Tatsache, daß die Oxime mit Halogenalkylen bei Gegenwart von Natriumalkoholat O-Alkylverbindungen liefern

$$^{X}_{Y}\!>\!C:NONa + J.Alk = \,^{X}_{Y}\!>\!C:NO\,Alk + NaJ$$

deren Konstitution daraus hervorgeht, daß sie bei der Spaltung O-Alkylhydroxylamin (S. 289) liefern. Sind danach also Isoxime

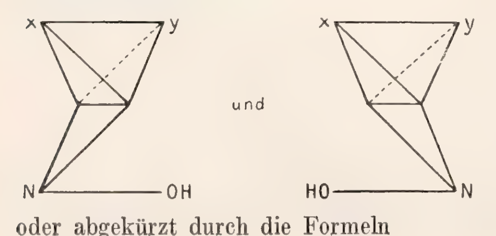
oder tautomere Oxime als solche unbekannt, so kennt man doch Derivate derselben, denn bei der Behandung der Oxime mit Halogenalkylen und Natriumalkoholat entstehen neben den angeführten O-Alkylverbindungen andere Alkylderivate, die sogar die einzigen Reaktionsprodukte sind, wenn man das Natriumalkoholat fortläßt. Diese Alkylderivate müssen N-Alkylverbindungen sein, denn sie liefern bei der Spaltung N-Alkylhydroxylamine (S. 289) und bei vorsichtiger Reduktion Dialkylamine, so daß ihr Stickstoffatom mit zwei verschiedenen Alkylresten verbunden sein muß. Hiernach müssen sich diese N-Alkyläther aber von einer Isoximformel ableiten und die Konstitution

$$\begin{matrix} X \\ Y \end{matrix}\!\!>C<\begin{matrix} N-Alk \\ | \\ O \end{matrix} \quad \text{oder} \quad \begin{matrix} X \\ Y \end{matrix}\!\!>C=N\begin{matrix} \diagup Alk \\ \diagdown\!\!\diagdown O \end{matrix}$$

haben.

Neuerdings neigt man dazu, die letztere dieser beiden Formeln für richtig zu halten.

Stereoisomerie der Oxime. Wie schon erwähnt, existieren viele Oxime in zwei isomeren Formen, die sich ineinander überführen lassen. Daß es sich hierbei nicht um Tautomerie handelt, geht schon daraus hervor, daß zuweilen zu jeder der beiden Formen ein zugehöriger O-Alkyläther darstellbar ist. Da nun die Isomerie der Oxime $\begin{matrix} X \\ Y \end{matrix}\!\!>C=NOH$ nur dann auftritt, wenn die beiden Reste X und Y untereinander verschieden sind und da außerdem gewisse, weiter unten ausführlich besprochenen Reaktionen darauf hindeuten, daß die Hydroxylgruppe und die eine der beiden Gruppen X und Y sich in dem einen Isomeren räumlich nah, in dem anderen aber räumlich fern stehen, muß es sich um Stereoisomerie handeln. Diese wird verständlich, wenn man nach der Hypothese von Hantzsch und Werner annimmt, daß die drei Valenzen des Stickstoffatoms bei Verbindungen, in denen das Stickstoffatom mit mehrfacher Bindung an ein anderes Atom gekettet ist, nicht in einer Ebene liegen (vgl. S. 275), sondern nach den Ecken eines Tetraeders hin gerichtet sind, dessen vierte Ecke vom Stickstoffatom selbst eingenommen wird. Die Raumformeln, die sich durch die Tetraeder-Schemata



oder abgekürzt durch die Formeln

$$\begin{matrix} X\text{-}C\text{-}Y \\ \| \\ N-OH \end{matrix} \quad \text{und} \quad \begin{matrix} X\text{-}C\text{-}Y \\ \| \\ HO-N \end{matrix}$$

darstellen lassen, zeigen, daß nach dieser Hypothese alle diejenigen Oxime, in denen X und Y verschieden sind, in zwei Konfigurationen existieren können, und daß in der einen Konfiguration die Hydroxylgruppe nahe zu Y aber entfernt von X, in der anderen dagegen nahe zu X und entfernt von Y steht. Man bezeichnet die beiden Konfigurationen als Syn- und Anti-Form, und zwar in dem Sinne, daß man diejenige Konfiguration als Syn-Form bezeichnet, in der die Hydroxylgruppe der mit ihr intramolekular reagierenden Gruppe nahe steht. So ist es für die Aldoxime, bei denen ja eine der beiden Gruppen X oder Y Wasserstoff ist, charakteristisch, daß eine der beiden Formen die Hydroxylgruppe mit dem Wasserstoff leicht als Wasser (unter Nitrilbildung) abspaltet, die andere Form dagegen nicht (s. S. 297). In der ersteren dieser beiden Formen wird die Hydroxylgruppe dem Wasserstoffatom räumlich nahe stehen und diese wird als Syn-Form

$$\begin{matrix} X-C-H \\ \quad\;\| \\ \quad\;N-OH \end{matrix}$$

die andere also als Anti-Form

$$\begin{matrix} X-C-H \\ \quad\;\| \\ HO-N\quad \end{matrix}$$

bezeichnet. Bei den Ketoximen, bei denen ja X und Y Alkylgruppen sind, fällt dieses Erkennungsmerkmal der Konfiguration fort. Man kann aber auch hier durch die weiter unten besprochene „Beckmannsche Umlagerung" für beide Formen bestimmen, welche der beiden Alkylgruppen der Hydroxylgruppe näher steht (s. S. 298). Die Auswahl der Bezeichnungen Syn und Anti ist hier zunächst willkürlich und wird erst dadurch charakteristisch, daß man der Vorsilbe Syn die Bezeichnung der der Hydroxylgruppe nahe stehenden Alkylgruppe unmittelbar folgen läßt. Hat man also für zwei isomere Ketoxime die Konfigurationen I und II bestimmt

$$\text{(I)}\ \begin{matrix} CH_3-C-C_2H_5 \\ \| \\ HO-N\qquad \end{matrix} \qquad \text{(II)}\ \begin{matrix} CH_3-C-C_2H_5 \\ \| \\ \qquad N-OH \end{matrix}$$

so ist es zunächst willkürlich, ob man I oder II als Syn-Form benennt, doch müßte man I als Synmethyläthylketoxim, II aber als Synäthylmethylketoxim bezeichnen, woraus sich dann die Bezeichnung der anderen Verbindung als Anti-Form ergibt.

In analoger Weise können Dioxime wie das Benzildioxim in drei stereoisomeren Formen existieren

(I) $C_6H_5.C$ — $C.C_6H_5$ / N.OH HO.N „Syn“

(II) $C_6H_5.C—C.C_6H_5$ / HO.N N.OH „Anti“

(III) $C_6H_5.C$ — $C.C_6H_5$ / HO.N HO.N „Amphi“

Als Grundlage für die Bezeichnung dient hier die gegenseitige Stellung der beiden Hydroxylgruppen. Die der größtmöglichen gegenseitigen Annäherung der beiden Hydroxylgruppen entsprechende Konfiguration heißt also hier Syn-Form, die Konfiguration größter gegenseitiger Entfernung der Hydroxylgruppen Anti-Form und die dritte Konfiguration Amphi-Form. Bei unsymmetrischen Dioximen sind sogar vier Isomere möglich, indem hier zwei verschiedene Amphi-Formen

X—C — C—Y / HO—N HO—N und X—C — C—Y / N—OH N—OH

denkbar sind.

Obwohl die Existenz zweier stereoisomerer Formen bei allen Aldoximen und bei allen unsymmetrischen Ketoximen möglich ist, hat man dieselben bisher nur bei einer beschränkten Anzahl von Oximen und zwar vorzugsweise bei solchen aromatischer Aldehyde und Ketone experimentell nachweisen können. Die aliphatischen Aldoxime kennt man meist nur in einer Modifikation und diese ist in allen bekannten Fällen offenbar die Syn-Form

Alk—C—H / N—OH

wie man aus der leichten Ueberführbarkeit in Nitrile schließen kann (s. S. 297). Auch bei den fettaromatischen Ketoximen ist noch keine Stereoisomerie beobachtet worden. Offenbar erklärt sich dies hier, wie bei den aliphatischen Aldoximen, daraus, daß die eine der beiden möglichen Formen äußerst labil ist und sich daher nicht isolieren läßt. Die stabile, isolierbare Form der fett- aromatischen Ketoxime entspricht stets der Syn-Aryl-Alphyl-Ketoxim-Form (s. S. 266 Anm.)

Alk—C—Ar / N—OH

d. h. die Hydroxylgruppe steht stets dem aromatischen Rest räumlich nahe, wie der Verlauf der Beckmannschen Umlagerung (s. S. 298) ergibt. Die unsymmetrischen aliphatischen Ketoxime, die bisher nur in flüssiger Form erhalten worden sind, scheinen Gemische der beiden möglichen Formen zu sein.

Die Darstellung der Oxime geschieht fast ausschließlich aus den Aldehyden oder Ketonen und Hydroxylamin

$$\frac{X}{Y}\!>C:O + H_2NOH = \frac{X}{Y}\!>C:NOH + H_2O$$

Da sich fast alle Aldehyde und Ketone „oximieren“ lassen, ist diese Umsetzung eine äußerst wichtige Erkennungsreaktion für Aldehyde und Ketone, und da letztere sich aus den Oximen leicht zurückgewinnen lassen, können sie auch auf diese Weise isoliert werden. Die Aldehyde werden durchgängig viel leichter in Oxime übergeführt als die Ketone. Letztere werden um so schwieriger oximiert, je größer und je verzweigter die an der Carbonylgruppe stehenden Alkylreste sind. Besonders schwer bilden sich die Oxime, wenn an der CO-Gruppe ein aromatischer Rest steht, dessen beide Orthostellungen besetzt sind (vgl. S. 298), was man auf eine sogenannte „sterische Behinderung“ zurückführt.

Die Aldehyde reagieren mit einer wässerigen oder wässerig-alkoholischen Lösung von Hydroxylaminchlorhydrat und der äquivalenten Menge Soda schon in der Kälte. Bei den Ketonen muß man oft längere Zeit mit Hydroxylaminchlorhydrat in alkoholischer Lösung erhitzen oder in stark alkalischer Lösung arbeiten.

Ketone, welche benachbart zur Carbonylgruppe eine Doppelbindung enthalten, können unter bestimmten Bedingungen entweder normale Oxime bilden oder nur Hydroxylamin an die Doppelbindung addieren (s. S. 289) oder auch beides gleichzeitig tun.

Wichtig ist noch, daß die Monoxime solcher Diketone und Aldehydketone, in denen die beiden Carbonylgruppen benachbart stehen, durch Einwirkung von salpetriger Säure auf Monoketone erhalten werden, indem in eine der CO-Gruppe benachbarte CH_2-Gruppe eine Isonitrosogruppe =NOH eintritt. Die so entstehenden Isonitrosoketone sind die Monoxime von Dicarbonylverbindungen.

$$CH_3.CO.CH_3 + ONOH = CH_3.CO.CH:NOH + H_2O$$

Asymmetrische Ketone, in denen zwei CH_2-Gruppen der CO-Gruppe benachbart stehen, liefern zwei verschiedene Isonitrosoketone. Die Monoalkylacetessigester liefern mit salpetriger Säure unter Verdrängung der Acetylgruppe α-Isonitrosofettsäureester, d. h. Oxime von α-Ketosäureestern, während die freien Alkylacetessigsäuren Kohlensäure und Isonitrosoketone, d. h. Monoxime von α-Diketonen geben.

Die stereoisomeren Formen der Oxime kann man, wie aus dem Vorhergehenden schon hervorgeht, im allgemeinen nur bei den echten aromatischen Aldehyden (vgl. S. 269) und den echten aromatisch unsymmetrischen Ketonen sowie den aromatischen Diketonen isolieren, doch sind auch die aromatischen

Aldoxime, welche im Benzolkern eine freie Hydroxylgruppe enthalten, nur in einer Form und zwar in der Anti-Form isolierbar. Für die Isolierung der beiden isomeren Formen ist es wichtig, daß die Synaldoxime meist gegen Alkalien stabil und gegen verdünnte, wässerige Säuren ziemlich labil, die Antialdoxime aber gegen Alkalien labil sind. Zur Isolierung der Antialdoxime muß man also im allgemeinen die Chlorhydrate der beiden Oxime mit Wasser zersetzen, während man bei Zusatz von Soda oder Alkali die Synaldoxime erhält. Bei den Aldoximen, welche im Kern einen Substituenten in Orthostellung enthalten, entsteht auch mit Alkali das Antioxim. Im übrigen lassen sich die beiden Formen durch verschiedene Einflüsse wechselseitig ineinander umlagern. So liefert Benzantialdoxim in ätherischer Lösung mit trockenem Chlorwasserstoff über 0° das Chlorhydrat des Benzsynaldoxims, während Benzsynaldoxim beim Erhitzen für sich oder in ätherischer Lösung sowie beim Stehen in alkoholischer Lösung in Benzantialdoxim übergeht.

Die sonst noch bekannten **Bildungsweisen** für Oxime kommen als Darstellungsmethoden kaum in Betracht. Oxime bilden sich noch bei der Oxydation von primären Aminen, wenn der am Stickstoff stehende Alkylrest primär oder sekundär ist (vgl. S. 289). Ist der Alkylrest primär, so entstehen Aldoxime, die aber leicht weiter oxydiert werden (s. S. 291)

$$X.CH_2.NH_2 \rightarrow X.CH_2.NHOH \rightarrow$$
$$X.CH{:}NOH \left(\rightarrow X.C\begin{matrix}OH\\NOH\end{matrix}\right)$$

Ist der Alkylrest dagegen sekundär, so entstehen ziemlich glatt Ketoxime

$$\begin{matrix}X\\Y\end{matrix}\rangle CH.NH_2 \rightarrow \begin{matrix}X\\Y\end{matrix}\rangle CH.NHOH \rightarrow$$
$$\begin{matrix}X\\Y\end{matrix}\rangle C{:}NOH.$$

Als Oxydationsmittel dient die sogenannte Carosche Säure (Sulfomonopersäure).

Bei der Reduktion von Nitroparaffinen mit primärem oder sekundärem Alkylrest zu Alkylhydroxylaminen (s. S. 289) entstehen als Zwischenprodukte ebenfalls Oxime

$$X.CH_2.NO_2 \rightarrow X.CH_2.NO \rightarrow X.CH:NOH$$
$$\begin{matrix}X\\Y\end{matrix}\rangle CH.NO_2 \rightarrow \begin{matrix}X\\Y\end{matrix}\rangle CH.NO \rightarrow \begin{matrix}X\\Y\end{matrix}\rangle C:NOH$$

Auch bei der Reduktion von Pseudonitrolen entstehen Ketoxime

$$\begin{matrix}X\\Y\end{matrix}\rangle C\langle\begin{matrix}NO_2\\NO\end{matrix} \rightarrow \left[\begin{matrix}X\\Y\end{matrix}\rangle C\langle\begin{matrix}NHOH\\NHOH\end{matrix}\right] \rightarrow$$
$$\begin{matrix}X\\Y\end{matrix}\rangle C{:}NOH$$

Schließlich entstehen Oxime bei der Einwirkung von Jodalkylen auf das Natriumsalz des Nitrohydroxylamins (s. S. 269)

$$HO.N\begin{matrix}H\\NO_2\end{matrix} + J.CH_2.X =$$
$$\left|HO.N\begin{matrix}CH_2.X\\NO_2\end{matrix} + HJ =\right|$$
$$HO.N{:}CH.X + HNO_2 + HJ.$$

Eigenschaften der Oxime. Die Oxime sind flüssige oder kristallinische farblose Körper. Die niedrigeren Oxime lassen sich unzersetzt destillieren. Das Formaldoxim polymerisiert sich leicht.

Oxime	Fp.	Sdp.
Formaldoxim	flüssig	84°
Acetaldoxim	47 °	115°
Propionaldoxim	21,5°	135°
Benzaldoxim „Syn"	125 °	—
„ „Anti"	35 °	117 ° (14 mm)
Acetonoxim (Acetoxim)	59 °	135°
Acetophenonoxim	59°	—
Benzophenonoxim	140 °	—

Ueber ihre Fähigkeit, in stereoisomeren Formen zu existieren und über deren wechselseitige Ueberführbarkeit ist im vorstehenden alles Nötige gesagt worden. Die Oxime haben sowohl saure als auch basische Eigenschaften, das heißt sie bilden durch Ersatz des Hydroxylwasserstoffes Metallsalze und sind auch in wässerigen Alkalien löslich. Andererseits bilden sie in indifferenten Lösungsmitteln auch Chlorhydrate, die aber von Wasser hydrolysiert werden, so daß man die Oxime aus den Lösungen ihrer Alkalisalze mit verdünnten Mineralsäuren ausscheiden kann. Beim Erwärmen mit Mineralsäuren werden die Oxime in Hydroxylamin und Aldehyd oder Keton gespaltet

$$\begin{matrix}X\\Y\end{matrix}\rangle C{:}NOH + H_2O = \begin{matrix}X\\Y\end{matrix}\rangle C{:}O + H_2NOH$$

Durch Oxydation können Aldoxime in Hydroxamsäuren übergeführt werden (s. S. 291), während bei der Reduktion alle Oxime schließlich Alkylamine liefern (s. S. 272).

Aether und Ester der Oxime. Wie schon erwähnt, kann man in die Oxime Alkylgruppen einführen. Hierbei entstehen, abgesehen von den durch Stereoisomerie bedingten Isomeriefällen, zwei verschiedene Reihen von Aethern. Die eine Reihe von Aethern die **O-Alkyläther** enthalten die Alkylgruppe an Sauerstoff gebunden und entsprechen in ihrer Konstitution

$$\begin{matrix}X\\Y\end{matrix}\rangle C{:}NOAlk$$

der normalen Oximformel, während die zweite Reihe das Alkyl an Stickstoff gebunden ent-

hält und sich daher von einer Isoximformel ableiten muß (s. S. 293)

$$\begin{matrix}X\\Y\end{matrix}\!\!>C\!<\!\begin{matrix}N.Alk\\|\\O\end{matrix} \quad \text{oder} \quad \begin{matrix}X\\Y\end{matrix}\!\!>C{=}N\!<\!\begin{matrix}Alk\\O\end{matrix}$$

Diese Verbindungen werden als N-Alkyläther der Oxime bezeichnet.

Solche N-Aether entstehen, wenn man die Oxime mit Halogenalkylen erhitzt, während bei gleichzeitigem Zusatz von Alkali gewöhnlich beide Aether nebeneinander entstehen. Welcher von beiden Aethern hierbei als Hauptprodukt entsteht, hängt sowohl von der Art des Oxims als auch des Halogenalkyls ab. So liefert z. B. Benzylchlorid bei Gegenwart von Alkali mit Synbenzaldoxim hauptsächlich N-Aether, mit Antibenzaldoxim dagegen hauptsächlich O-Aether.

Bei der Spaltung liefern die O-Aether O-Alkylhydroxylamine, die N-Aether N-Alkylhydroxylamine (s. S. 288).

Sowohl die O- als auch die N-Aether entstehen übrigens auch aus den O- und N-Alkylhydroxylaminen mit Aldehyden und Ketonen.

Als einen ringförmigen N-Phenyläther des Benzaldoxims kann man das Anthranil bezeichnen (vgl. S. 282), das man als inneres Anhydrid des unbeständigen o-Hydroxylaminobenzaldehyds auffaßt und das z. B. durch Reduktion von o-Nitrobenzaldehyd entsteht

$$C_6H_4\begin{matrix}NO_2\\CH{:}O\end{matrix} \rightarrow \left[C_6H_4\begin{matrix}N\!<\!\begin{matrix}OH\\H\end{matrix}\\CH{:}O\end{matrix}\right] \rightarrow C_6H_4\begin{matrix}N\\CH\end{matrix}\!\!>O$$

Auch Acylgruppen kann man in die Oxime einführen und so Oximester darstellen, indem man die Oxime mit Säureanhydriden behandelt. Hierbei tritt der Säurerest im allgemeinen an den Sauerstoff, man bekommt also Ester, die der normalen Oximformel entsprechen

$$\begin{matrix}X\\Y\end{matrix}\!\!>C{:}NOH \rightarrow \begin{matrix}X\\Y\end{matrix}\!\!>C{:}NO.CO.Alk$$

Unter gewissen Umständen scheinen jedoch auch N-Ester entstehen zu können, die einer Isoximformel entsprechen. Wenigstens liefert Acetoxim, bei dem ja Stereoisomerie ausgeschlossen ist, zwei verschiedene Benzoylderivate.

Die O-Acylderivate der Ketoxime sind beständige Verbindungen. Bei den O-Acylderivaten der Aldoxime hängt dagegen die Beständigkeit von der räumlichen Anordnung ab. Die O-Acylantialdoxime sind nämlich ebenfalls beständige Körper, während die O-Acylsynaldoxime, in denen Aldehydwasserstoff und Säurerest sich räumlich nahe stehen, außerordentlich leicht unter Säureabspaltung in Nitrile übergehen

$$\begin{matrix}X{-}C{-}H\\ \|\\ NO.CO.Alk\end{matrix} = \begin{matrix}X.C\\ \|\!|\\ N\end{matrix} + Alk.COOH$$

so daß sie in den meisten Fällen gar nicht isolierbar sind. So liefert das eine Benzaldoxim ein beständiges Acetylderivat, während das Acetylderivat des anderen Isomeren schon in der Kälte mit Sodalösung Benzonitril liefert. Hiernach muß das letztgenannte Oxim das Syn-Oxim sein. Aus den aliphatischen Aldoximen enthält man bei der Behandlung mit Säureanhydriden fast immer direkt das Nitril, d. h. das Säureanhydrid wirkt scheinbar nur wasserabspaltend

$$\begin{matrix}X{-}C{-}H\\ \|\\ N{-}OH\end{matrix} = \begin{matrix}X{-}C\\ \|\!|\\ N\end{matrix} + H_2O$$

Hieraus schließt man, daß die bekannten aliphatischen Aldoxime der Syn-Konfiguration angehören (vgl. S. 295).

Diese Reaktion ist nicht nur für die Konfigurationsbestimmung der Aldoxime (s. S. 294), sondern auch als Darstellungsmethode für Nitrile (s. S. 284) von Bedeutung.

Beckmannsche Umlagerung. Sehr wichtig ist eine eigenartige Umlagerung, die viele Ketoxime unter der Einwirkung von Salzsäure, Säurechloriden und anderen Agentien in benzolischer oder eisessigsaurer Lösung erleiden und die gewöhnlich als „Beckmannsche Umlagerung" bezeichnet wird. Sie äußert sich darin, daß die Oxime unter dem Einfluß der genannten Mittel in alkylierte Säureamide übergehen (s. S. 278). So liefert Benzophenonoxim Benzanilid

$$\begin{matrix}C_6H_5\\C_6H_5\end{matrix}\!\!>C{=}NOH \longrightarrow \begin{matrix}C_6H_5\\C_6H_5.NH\end{matrix}\!\!>CO$$

Diese Umlagerung erklärt sich am einfachsten, wenn man annimmt, daß eine der beiden Alkylgruppen des Ketons mit der Hydroxylgruppe den Platz tauscht. Die hierbei resultierende Verbindung stellt sich in der Formel als die tautomere Form eines substituierten Säureamids dar (s. S. 278)

$$\begin{matrix}C_6H_5{-}C{-}C_6H_5\\ \|\\ HO{-}N\end{matrix} \longrightarrow \begin{matrix}HO{-}C{-}C_6H_5\\ \|\\ C_6H_5{-}N\end{matrix} \longrightarrow \begin{matrix}O{=}C{-}C_6H_5\\ |\\ C_6H_5{-}NH\end{matrix}$$

Ist das zugrundeliegende Keton unsymmetrisch gebaut, so werden bei der „Beckmannschen Umlagerung" des Oxims zwei verschiedene Säureamide entstehen können, je nachdem die eine oder die andere Alkylgruppe mit der Hydroxylgruppe den Platz wechselt. Nun geben in der Tat die beiden stereoisomeren Formen eines Ketoxims gewöhnlich zwei verschiedene Säureamide, und zwar in der Weise, daß die stabilere Modifikation nur das eine der beiden möglichen Säureamide, die labilere Modifikation aber zwar auch gewisse Mengen desselben,

vorherrschend aber das andere der beiden möglichen Säureamide liefert. Es zeigt sich also deutlich, daß jeder der beiden stereoisomeren Modifikationen ein bestimmtes Säureamid entspricht, wenn auch die eine der beiden Formen nicht nur das ihrer eigenen Konfiguration entsprechende, sondern auch — offenbar infolge teilweiser Umlagerung in die stabilere Form — gewisse Mengen des anderen Amids ergibt. Dies deutet unter Zugrundelegung der Hantzsch-Wernerschen Theorie (s. S. 294) mit Bestimmtheit darauf hin, daß in jedem Falle die Hydroxylgruppe den Platz mit derjenigen Alkylgruppe wechselt, die ihr räumlich am nächsten steht. Man kann also auf diese Weise die Konfiguration stereoisomerer Ketoxime feststellen (s. S. 294).

So kennt man zwei isomere Oxime des Anisylphenylketons. Von diesen liefert das höher schmelzende bei der Beckmannschen Umlagerung des Anilid der Anissäure (Ib), das tiefer schmelzende aber das Anisidid der Benzoesäure (IIb). Hieraus ergibt sich für das Oxim vom Schmelzpunkt 137° die Konfiguration Ia eines Syn-Phenylanisylketoxims (vgl. S. 294), während das Oxim vom Schmelzpunkt 116° Anti-Phenylanisylketoxim von der Konfiguration IIa sein muß

$$\text{I a)}\ \begin{array}{r} CH_3O.C_6H_4.C.C_6H_5 \\ \| \quad\ \ \\ N.OH \end{array} \longrightarrow \left[\begin{array}{r} CH_3O.C_6H_4.C.OH \\ \| \quad \\ N.C_6H_5 \end{array}\right] \longrightarrow \text{b)}\ \begin{array}{r} CH_3O.C_6H_4.C:O \\ | \quad\ \ \\ NH.C_6H_5 \end{array}$$

$$\text{II a)}\ \begin{array}{l} CH_3O.C_6H_4.C.C_6H_5 \\ \qquad\qquad\ \ \| \\ \qquad\quad HO.N \end{array} \longrightarrow \left[\begin{array}{r} HO.C.C_6H_5 \\ \| \qquad \\ CH_3O.C_6H_4.N \qquad \end{array}\right] \longrightarrow \text{b)}\ \begin{array}{r} O:C.C_6H_5 \\ | \qquad \\ CH_3O.C_6H_4.NH \qquad \end{array}$$

Ebenso kann man für die fettaromatischen Ketoxime (s. S. 295), die nur in einer Form bekannt sind, schließen daß sie durchweg Syn-Arylalphylketoxime sind, weil sie bei der Beckmannschen Umlagerung stets Arylamide aliphatischer Säuren liefern. Daß auch die Oxime zyklischer Ketone zur Beckmannschen Umlagerung befähigt sind, ist schon früher (S. 282) erwähnt worden. Sie liefern in normaler Weise Laktame, d. h. zyklische substituierte Säureamide.

Wenn die Aldoxime in gleicher Weise die Beckmannsche Umlagerung erleiden würden, müßten aus den Syn-Oximen einfache Säureamide, aus den Anti-Oximen aber substituierte Formamide entstehen. In der Regel liefern aber die Aldoxime nur Nitrile, weil die bei den Ketoximen in der gedachten Weise wirkenden Agentien die Anti-Aldoxime meist momentan in Syn-Aldoxime umlagern, auf letztere aber wasserabspaltend wirken. Nur in seltenen Fällen, wenn die Antiform besonders beständig ist, läßt sich hier die Beckmannsche Umlagerung verwirklichen. So liefert das Antioxim des symm. Trimethylbenzaldehyds mit Phosphorpentachlorid in der Tat Formmesidid

$$\begin{array}{l} (CH_3)_3.C_6H_2.C.H \\ \qquad\qquad\quad\ \| \\ \qquad\quad\ HO.N \end{array} \longrightarrow \left[\begin{array}{r} HO—C—H \\ \| \quad\ \\ (CH_3)_3C_6H_2.N \quad\ \end{array}\right]$$

$$\longrightarrow \begin{array}{r} O:C.H \\ | \quad\ \\ (CH_3)_3.C_6H_2.NH \quad\ \end{array}$$

Einen der Beckmannschen Umlagerung analogen Platzwechsel nimmt man übrigens noch bei manchen anderen Reaktionen an (s. z. B. S. 273, 293 und 300).

Chinonoxime. Eine Sonderstellung unter den Ketoximen nehmen die Chinonoxime ein. Die Chinone, die man ja jetzt allgemein als Diketone von der Konstitution

$$\begin{array}{ccc} & O & \\ & \| & \\ & C & \\ / & & \backslash \\ HC & & CH \\ \| & & \| \\ HC & & CH \\ \backslash & & / \\ & C & \\ & \| & \\ & O & \end{array}$$

auffaßt, werden zwar von alkalischem Hydroxylamin zu Hydrochinonen reduziert, liefern aber mit salzsaurem Hydroxylamin unter geeigneten Bedingungen in normaler Weise erst Monoxime und schließlich Dioxime

$$\begin{array}{ccc} & NOH & \\ & \ddot{C} & \\ / & & \backslash \\ HC & & CH \\ \| & & \| \\ HC & & CH \\ \backslash & & / \\ & C & \\ & \ddot{O} & \end{array} \qquad\qquad \begin{array}{ccc} & NOH & \\ & \ddot{C} & \\ / & & \backslash \\ HC & & CH \\ \| & & \| \\ HC & & CH \\ \backslash & & / \\ & C & \\ & \ddot{N}OH & \end{array}$$

Chinonmonoxim Chinondioxim

Nur wenn die beiden Orthostellungen zu einer Carbonylgruppe durch Alkylreste oder Halogenatome substituiert sind, ist an dieser CO-Gruppe keine Oximbildung mehr möglich (vgl. S. 295).

Von Interesse ist die Tatsache, daß sich die Chinonmonoxime als identisch erwiesen haben mit den p-Nitrosophenolen. Es liegt hier Tautomerie im Sinne der beiden Formeln

$$\begin{array}{ccc} \text{NOH} & & \text{N:O} \\ \ddot{\text{C}} & & \dot{\text{C}} \\ \text{HC}\quad\text{CH} & \rightleftarrows & \text{HC}\quad\text{CH} \\ \text{HC}\quad\text{CH} & & \text{HC}\quad\text{CH} \\ \text{C} & & \text{C} \\ \ddot{\text{O}} & & \dot{\text{O}}\text{H} \end{array}$$

Chinonmonoxim Nitrosophenol

vor. Für die freien Verbindungen nimmt man jetzt ziemlich allgemein die Chinonoximform, für die Alkalisalze dagegen die Nitrosophenolform an. Aus der genannten Tautomerie folgt, daß man die Chinonmonoxime auch aus Phenolen mit salpetriger Säure und aus den p-Nitrosoverbindungen tertiärer aromatischer Amine durch Spaltung mit Alkali (s. S. 271 und 274) gewinnen kann. Bei der Alkylierung und Acylierung liefern die Chinonmonoxime und die Chinondioxime normale Oxim-O-Aether und Ester (vgl. S. 296). Auch das Ortho-Chinondioxim ist bekannt.

Als Oxim des Kohlenoxyds kann man die Knallsäure C=N—OH betrachten (s. S. 288). Sie ist eine zersetzliche, wie Blausäure riechende äußerst giftige Substanz, die wie alle Derivate des zweiwertigen Kohlenstoffs (vgl. S. 119) imstande ist, die verschiedensten Verbindungen zu addieren. So bildet sie mit Salzsäure Formylchloridoxim (s. S. 176)

$$HO.N:C + HCl = HO.N:C\genfrac{}{}{0pt}{}{H}{Cl}$$

Die Knallsäure ist eine starke Säure und gibt mit den verschiedensten Metallen Salze, die sogenannten „Fulminate", von denen namentlich das Knallquecksilber $(C:NO)_2Hg + {}^1/_2\,H_2O$ wichtig ist.

Es explodiert durch Stoß und Schlag mit furchtbarer Heftigkeit und wird zur Herstellung von Zündhütchen und Patronen verwendet. Es entsteht in komplizierter Reaktion aus Natriumnitromethan und Quecksilberchlorid sowie aus Alkohol und einer Lösung von Quecksilber in überschüssiger Salpetersäure (vgl. den Artikel „Explosion").

δ) Gemischte Hydroxylaminderivate. Den Imidchloriden als Ammoniakderivaten (s. S. 283) entsprechen als Hydroxylaminderivate Oximidchloride

$$X.C\genfrac{}{}{0pt}{}{\diagup NOH}{\diagdown Cl}$$

die man gewöhnlich als Hydroximsäurechloride bezeichnet. Sie sind wie die Imidchloride unbeständige Körper. Das niedrigste Oximidchlorid, das Formhydroximsäurechlorid oder, wie es gewöhnlich genannt wird, Formylchloridoxim $H.C\genfrac{}{}{0pt}{}{\diagup NOH}{\diagdown Cl}$ ist von Interesse durch seine Beziehungen zur Knallsäure (s. oben), aus der es durch Addition von Chlorwasserstoff entsteht. Die wenigen sonst noch bekannten Hydroximsäurechloride, wie Acet- und Benzhydroximsäurechlorid sind durch Einwirkung von Chlor auf die Aldoxime erhalten worden

$$X.C\genfrac{}{}{0pt}{}{\diagup H}{\diagdown NOH} \longrightarrow X.C\genfrac{}{}{0pt}{}{\diagup Cl}{\diagdown NOH}$$

Auch O-Aether dieser Chloride $X.C\genfrac{}{}{0pt}{}{\diagup Cl}{\diagdown NOAlk}$ hat man darstellen können und zwar durch Einwirkung von salpetriger Säure und Salzsäure auf die im folgenden beschriebenen Amidoxime (s. S. 300).

Die Amidoxime oder Oxamidine kann man sich aus den Amidinen (S. 283) entstanden denken, indem man einen Ammoniakrest durch einen Hydroxylaminrest oder indem man in einem der beiden Ammoniakreste ein Wasserstoff durch Hydroxyl ersetzt. Je nachdem dies an der Amido- oder an der Imidogruppe geschieht, erhält man zwei Formeln, die zueinander im Verhältnis tautomerer Modifikationen stehen

$$X.C\genfrac{}{}{0pt}{}{\diagup NOH}{\diagdown NH_2} \rightleftarrows X.C\genfrac{}{}{0pt}{}{\diagup NHOH}{\diagdown NH}$$

Aus dem Verhalten der Amidoxime schließt man, daß denselben die erste der beiden Formeln zukommt.

Die Amidoxime entstehen durch Addition von Hydroxylamin an die Nitrile (s. S. 285), so das Acet- oder Aethenylamidoxim

$$CH_3.C\vdots N + NH_2OH = CH_3.C\genfrac{}{}{0pt}{}{\diagup NH_2}{\diagdown NOH}$$

Außerdem entstehen Amidoxime bei der Einwirkung von Hydroxylamin auf Thiamide, Amidine und Iminoäther und bei der Einwirkung von Ammoniak auf die Hydroximsäurechloride.

Die Amidoxime sind gut kristallisierende aber ziemliche zersetzliche Körper, die mit Wasser leicht in Amide und Hydroxylamin zerfallen. Sie sind gleichzeitig Basen und Säuren. Mit Mineralsäuren bilden sie beständige Salze, während die Metallsalze leicht zersetzlich sind. Mit Fehlingscher Lösung bilden sie charakteristische basische Kupfersalze. Eisenchlorid färbt die alkoholische Lösung der Amidoxime tiefrot. Mit salpetriger Säure liefern die Amidoxime Säureamide und Stickoxydul

$$X.C\genfrac{}{}{0pt}{}{\diagup NOH}{\diagdown NH_2} + HNO_2 = X.C\genfrac{}{}{0pt}{}{\diagup O}{\diagdown NH_2} + N_2O + H_2O$$

Die Konstitution der Metallsalze der

Amidoxime geht daraus hervor, daß sie mit Halogenalkylen O-Aether liefern

$$C_6H_5.C\begin{matrix}\diagup NOK\\ \diagdown NH_2\end{matrix} + CH_3J = C_6H_5.C\begin{matrix}\diagup NOCH_3\\ \diagdown NH_2\end{matrix}$$

Diese Aether besitzen keine sauren Eigenschaften mehr, sondern nur basische. Daß sie mit salpetriger Säure und Salzsäure O-Aether der Hydroximsäurechloride liefern,

$$C_6H_5.C\begin{matrix}\diagup NO\,Alk\\ \diagdown NH_2\end{matrix} + HNO_2 + HCl$$

$$= C_6H_5.C\begin{matrix}\diagup NO\,Alk\\ \diagdown Cl\end{matrix} + N_2 + 2H_2O$$

ist schon (S. 299) erwähnt worden. Mit Säurechloriden liefern die Amidoxime in analoger Weise O-Ester

$$C_6H_5.C\begin{matrix}\diagup NOH\\ \diagdown NH_2\end{matrix} + CH_3COCl$$

$$= C_6H_5.C\begin{matrix}\diagup NOCO.CH_3\\ \diagdown NH_2\end{matrix} + HCl$$

Diese Ester spalten leicht Wasser ab und gehen in die sogenannten Azoxime über, die bei den heterozyklischen Verbindungen näher besprochen werden

$$C_6H_5.C\begin{matrix}\diagup N.O\diagdown CO.CH_3\\ \diagdown NH_2\end{matrix}$$

$$\longrightarrow C_6H_5.C\begin{matrix}\diagup N—O\diagdown\\ \quad N \quad\diagup\end{matrix}C.CH_3 + H_2O$$

Aethenylbenzenylazoxim

In ähnlicher Weise kondensieren sich die Amidoxime mit Aldehyden zu Hydrazoximen. Bei Gegenwart von Phosphorpentachlorid oder Benzolsulfochlorid gehen die Amidoxime in Alkylharnstoffe über, indem sie eine Beckmannsche Umlagerung (s. S. 297) erleiden

$$\begin{matrix}C_6H_5—C—NH_2\\ \|\\ HO—N\end{matrix} \longrightarrow \left[\begin{matrix}HO—C—NH_2\\ \|\\ C_6H_5—N\end{matrix}\right] \longrightarrow \begin{matrix}O = C\quad NH_2\\ |\\ C_6H_5.NH\end{matrix}$$

Auch Diamiddioxime zweibasischer Säuren kennt man, so das Succindiamiddioxim, das leicht unter Ammoniakabspaltung in ein Imiddioxim, das Succinimiddioxim übergeht (vgl. S. 284)

$$\begin{matrix}CH_2—C(:NOH)NH_2\\ |\\ CH_2—C(:NOH)NH_2\end{matrix} \longrightarrow \begin{matrix}CH_2—C(:NOH)\diagdown\\ |\qquad\qquad\quad NH\\ CH_2—C(:NOH)\diagup\end{matrix}$$

Denkt man sich in den Amidinen beide Ammoniakreste durch Hydroxylaminreste ersetzt, so kommt man zu den sogenannten Hydroxamoximen oder Oxyamidoximen.

$$X.C\begin{matrix}\diagup NOH\\ \diagdown NHOH\end{matrix}$$

Dieselben sind ziemlich unbeständige Körper, die aus den Hydroximsäurechloriden (S. 299) mit Hydroxylamin entstehen

$$X.C\begin{matrix}\diagup NOH\\ \diagdown Cl\end{matrix} + NH_2OH = X.C\begin{matrix}\diagup NOH\\ \diagdown NHOH\end{matrix} + HCl$$

In einigen Fällen sind bei der Einwirkung von Hydroxylamin auf Ester, offenbar durch erneute Addition von Hydroxylamin an die primär gebildeten Hydroxamsäuren, sogenannte Hydroxamoximhydrate $X.C\begin{matrix}\diagup NHOH\\ —NHOH\\ \diagdown OH\end{matrix}$ erhalten worden.

Es möge zum Schluß noch erwähnt werden, daß die den Iminoäthern entsprechenden Oximinoäther oder, wie sie gewöhnlich genannt werden, Alkylhydroximsäuren schon bei den Aethern der Hydroxamsäuren (S. 292) besprochen worden sind.

3e) Derivate des Hydrazins. *a*) Alkylhydrazine. Denkt man sich in den Komplex des Hydrazins eine Alkylgruppe für ein Wasserstoffatom eingeführt, so ist wegen der vollkommenen Symmetrie des Hydrazins keine Isomerie möglich. Von den Dialkylhydrazinen werden dagegen je zwei Isomere möglich sein, je nachdem die beiden Alkylgruppen an dem gleichen Stickstoffatom haften oder jedes Stickstoffatom eine Alkylgruppe trägt. Erstere bezeichnet man als unsymmetrische oder auch α-Dialkylhydrazine, letztere als symmetrische oder β-Dialkylhydrazine

$\begin{matrix}Alk\\ Alk\end{matrix}N—NH_2$	Alk.NH—NH.Alk
unsymmetrisch	symmetrisch.

Sind die beiden Alkylgruppen aromatischer Natur, so pflegt man nur die unsymmetrische Verbindung als Dialkylhydrazin, die symmetrische aber als Hydrazoverbindung zu bezeichnen

$\begin{matrix}C_6H_5\\ C_6H_5\end{matrix}N—NH_2$	$C_6H_5.NH—NH.C_6H_5$
Diphenylhydrazin	Hydrazobenzol.

Bei Trialkyl- und Tetraalkylhydrazinen ist Isomerie nur dann möglich, wenn die Alkylgruppen untereinander verschieden sind, und zwar sind je drei Isomere denkbar, wenn alle Alkylgruppen untereinander verschieden sind

$$\begin{matrix}a^1\diagdown\\ a^2\diagup\end{matrix}N—N\begin{matrix}\diagup a^3\\ \diagdown H\end{matrix} \quad \begin{matrix}a^1\diagdown\\ a^3\diagup\end{matrix}N—N\begin{matrix}\diagup a^2\\ \diagdown H\end{matrix} \quad \begin{matrix}a^2\diagdown\\ a^3\diagup\end{matrix}N—N\begin{matrix}\diagup a^1\\ \diagdown H\end{matrix}$$

$$\begin{matrix}a^1\diagdown\\ a^2\diagup\end{matrix}N—N\begin{matrix}\diagup a^3\\ \diagdown a^4\end{matrix} \quad \begin{matrix}a^1\diagdown\\ a^3\diagup\end{matrix}N—N\begin{matrix}\diagup a^2\\ \diagdown a^4\end{matrix} \quad \begin{matrix}a^1\diagdown\\ a^4\diagup\end{matrix}N—N\begin{matrix}\diagup a^2\\ \diagdown a^3\end{matrix}$$

Bei den Darstellungsmethoden für Alkylhydrazine ist wie gewöhnlich der prinzipielle Unterschied vorhanden, daß man aliphatische Reste (vgl. S. 272) durch Alkylierung direkt in den Hydrazinkomplex einführen kann, während man zur Darstellung

aromatischer Hydrazine eine schon an dem betreffenden aromatischen Kern haftende stickstoffhaltige Gruppe in die Hydrazinogruppe überführen muß.

Aliphatische Monoalkylhydrazine (primäre Alphylhydrazine) stellt man durch Behandeln von Hydrazin oder Hydrazinhydrat (S. 269) mit Halogenalkylen in der Kälte oder besser mit alkylschwefelsaurem Salz in der Hitze dar

$$C_2H_5OSO_2OK + 2H_2N.NH_2 = C_2H_5.NH.NH_2 + N_2H_4.HOSO_2OK$$

Man erhält sie auch, wenn man Monoalkylharnstoffe oder symmetrische Dialkylharnstoffe zunächst in Nitrosoverbindungen überführt, diese zu Alkylsemicarbaziden (vgl. S. 308) reduziert und letztere durch Kochen mit Alkalien oder Säuren spaltet

$$\begin{matrix} CO-N\langle{}^{H}_{X} \\ | \\ NHX \end{matrix} \rightarrow \begin{matrix} CO-N\langle{}^{NO}_{X} \\ | \\ NHX \end{matrix} \rightarrow \begin{matrix} CO-N\langle{}^{NH_2}_{X} \\ | \\ NHX \end{matrix}$$

$$\rightarrow CO_2 + XNH.NH_2 + NH_2X$$

Aromatische Monoalkylhydrazine gewinnt man gewöhnlich so, daß man ein aromatisches Amin in Form seines Chlorhydrats „diazotiert" d. h. mit salpetriger Säure in das betreffende Diazoniumchlorid überführt (s. Artikel „Azokörper") und dieses mit Zinnchlorür und Salzsäure reduziert.

$$C_6H_5.NH_2.HCl \xrightarrow{HNO_2} C_6H_5-\underset{Cl}{\underset{|}{N}}\equiv N \xrightarrow{4H}$$

Anilinchlorhydrat Benzoldiazoniumchlorid

$$C_6H_5.NH.NH_2, HCl$$

Phenylhydrazinchlorhydrat

Man kann auch zweckmäßig das Diazoniumchlorid zunächst durch Zusatz von Alkalisulfit in ein diazosulfosaures Salz überführen und dieses mit Zinkstaub und Essigsäure zu einem Salz der Phenylhydrazinsulfosäure reduzieren, das mit Säuren leicht Phenylhydrazin liefert. (Näheres siehe Artikel Azokörper)

$$C_6H_5.NH_2.HCl \xrightarrow{HNO_2} C_6H_5.N_2Cl \xrightarrow{Na_2SO_3} C_6H_5.N_2.SO_3Na \xrightarrow{2H} C_6H_5.NH.NH.SO_3Na \xrightarrow{H_2O} C_6H_5.NH.NH_2 + NaHSO_4$$

Auch Diazoaminoverbindungen liefern bei der Reduktion Arylhydrazine neben Aminen.

Asymmetrische Dialkylhydrazine rein aliphatischer Natur erhält man neben Monoalkylhydrazinen beim Schütteln einer wässerigen Hydrazinhydratlösung mit Jodalkyl in der Kälte, indem bei weiterer Alkylierung der Monoalphylhydrazine die zweite Alkylgruppe stets an das schon alkylierte Stickstoffatom tritt

$$H_2N-NH_2 \rightarrow H_2N-NHAlk \rightarrow H_2N-N(Alk)_2$$

Gemischte asymmetrische Dialkylhydrazine kann man gleichfalls darstellen, indem man primäre aromatische Hydrazine weiter alkyliert. Auch hierbei entsteht das asymmetrische Hydrazin in überwiegender Menge, daneben jedoch auch symmetrisches Alphylarylhydrazin. Man kann beide dadurch trennen, daß man das symmetrische Produkt mit Hilfe von Quecksilberoxyd zu dem betreffenden fettaromatischen Azokörper oxydiert, der nicht mehr basisch ist und sich daher aus der sauren Lösung leicht abtrennen läßt.

Man kann die Bildung des symmetrischen Produktes vermeiden, wenn man an Stelle des freien aromatischen Hydrazins dessen Natriumverbindung mit Halogenalkyl behandelt.

Asymmetrische Dialkylhydrazine beliebiger Art erhält man durch Reduktion der Nitrosamine sekundärer Amine (vgl. S. 274) mit Zinkstaub und Essigsäure

$$\begin{matrix} X \\ Y \end{matrix}\rangle NH \xrightarrow{HNO_2} \begin{matrix} X \\ Y \end{matrix}\rangle N-NO \xrightarrow{4H} \begin{matrix} X \\ Y \end{matrix}\rangle N-NH_2$$

Symmetrische aliphatische Dialkylhydrazine muß man auf einem Umwege darstellen, indem man ein symmetrisches Diacylhydrazin oder dessen Alkaliverbindung (s. S. 304) z. B. Diformylhydrazinnatrium alkyliert und dann mit starken Säuren spaltet, da die direkte Alkylierung des Hydrazins nicht zu symmetrischen Produkten führt

$$\begin{matrix} OCH \\ H \end{matrix}\rangle N-N\langle\begin{matrix} CHO \\ H \end{matrix} \longrightarrow \begin{matrix} OCH \\ Alph \end{matrix}\rangle N-N\langle\begin{matrix} CHO \\ Alph \end{matrix}$$

$$\longrightarrow \begin{matrix} H \\ Alph \end{matrix}\rangle N-N\langle\begin{matrix} H \\ Alph \end{matrix} + 2HCOOH$$

Man kann auch Pyrazol oder Pyrazolone mit Jodalkylen in Alkylpyrazoljodalkylate überführen und diese mit Kalilauge spalten (vgl. den Artikel „Heterozyklische Verbindungen")

$$CH\langle\begin{matrix} CH-N.CH_3 \\ | \\ CH=N.CH_3J \end{matrix} \longrightarrow \begin{matrix} HNCH_3 \\ HNCH_3 \end{matrix}$$

Außerdem entstehen symmetrische gemischte Dialkylhydrazine wie schon erwähnt auch durch Alkylierung von primären aromatischen Hydrazinen und können durch Ueberführung in Azokörper und mit Hilfe der folgenden Methode isoliert werden.

Symmetrische aromatische und gemischte Dialkylhydrazine erhält man durch Reduktion der betreffenden Azokörper mit Hilfe von Zinkstaub und alkoholischer Kalilauge oder von anderen alkalischen Reduktionsmitteln

$$X.N = N.Y \rightarrow XNH - NHY$$

Da die aromatischen Azoverbindungen ihrerseits durch Reduktion aus Nitro- oder Azoxy

verbindungen entstehen, kann man auch letztere beiden Körperklassen direkt zu Hydrazoverbindungen reduzieren (vgl. den Artikel „Azokörper“).

Rein aliphatische oder aromatische Tri- und Tetraalkylhydrazine sind bisher nicht bekannt. Dagegen kann man gemischte Verbindungen dieser Art erhalten, indem man in asymmetrische Arylalphylhydrazine zunächst den Rest der Ameisensäure einführt, das Natriumsalz der Formylverbindung mit Jodalkyl alkyliert und nun die Formylgruppe wieder abspaltet

$$\mathrm{\begin{matrix}Ar\\Alph\end{matrix}\!\!>\!N.NH_2 \longrightarrow \begin{matrix}Ar\\Alph\end{matrix}\!\!>\!N.N\!\begin{matrix}CHO\\H\end{matrix} \longrightarrow}$$

$$\mathrm{\begin{matrix}Ar\\Alph\end{matrix}\!\!>\!N.N\!\begin{matrix}CHO\\Na\end{matrix} \longrightarrow \begin{matrix}Ar\\Alph\end{matrix}\!\!>\!N.N\!<\!\begin{matrix}CHO\\Alph\end{matrix}}$$

$$\mathrm{\longrightarrow \begin{matrix}Ar\\Alph\end{matrix}\!\!>\!N.N\!\begin{matrix}H\\Alph.\end{matrix}}$$

Die so erhaltenen Trialkylhydrazine liefern bei weiterer Alkylierung in kleinen Mengen Tetraalkylhydrazine neben den als Hauptprodukt entstehenden quartären Azoniumverbindungen (s. S. 303)

$$\mathrm{\begin{matrix}Ar\\Alph\end{matrix}\!\!>\!N.N\!<\!\begin{matrix}H\\Alph\end{matrix} \longrightarrow \begin{matrix}Ar\\Alph\end{matrix}\!\!>\!N.N\!<\!\begin{matrix}Alph\\Alph.\end{matrix}}$$

In symmetrische Diarylhydrazine (Hydrazoverbindungen) läßt sich noch eine aliphatische Alkylgruppe durch Alkylierung einführen.

$$\mathrm{\begin{matrix}Ar\\H\end{matrix}\!\!>\!N-N\!<\!\begin{matrix}Ar\\H\end{matrix} \longrightarrow \begin{matrix}Ar\\H\end{matrix}\!\!>\!N-N\!<\!\begin{matrix}Ar\\Alph.\end{matrix}}$$

Eigenschaften und Umwandlungen. Die Alkylderivate des Hydrazins sind zunächst, wie das Hydrazin selbst (s. S. 269), Basen. Die basische Natur des Hydrazins wird wie die des Ammoniaks (vgl. S. 269) durch niedrige aliphatische Reste nicht geschwächt, sondern sogar verstärkt. So sind die Mono- und Dialphylhydrazine starke zweisäurige Basen, d. h. sie können z. B. Monochlorhydrate und Dichlorhydrate bilden. Dagegen heben aromatische Reste die Basizität desjenigen Stickstoffatoms, an dem sie haften, auf und schwächen auch die basischen Eigenschaften des anderen Stickstoffatoms. So sind die primären aromatischen Hydrazine noch ausgeprägte einsäurige Basen, d. h. sie bilden mit einem Molekül Salzsäure noch beständige Chlorhydrate. Andererseits ist in ihnen das an dem phenylierten Stickstoff noch vorhandene Wasserstoffatom durch Natrium ersetzbar geworden. Phenylhydrazin bildet also sowohl ein Chlorhydrat als auch ein Natriumsalz

$$\mathrm{\begin{matrix}C_6H_5.NH\\ |\\ NH_2,\ HCl\end{matrix} \qquad \begin{matrix}C_6H_5.N-Na\\ |\\ NH_2\end{matrix}}$$

Die asymmetrischen Diarylhydrazine bilden auch noch einsäurige Salze, die aber von Wasser schon teilweise hydrolysiert werden. Die symmetrischen Diarylhydrazine, die Hydrazoverbindungen, besitzen gar keinen basischen Charakter mehr. Dagegen werden sie durch Säuren leicht in basische Verbindungen anderer Konstitution umgelagert (Benzidinumlagerung s. S. 303).

Die aliphatischen Hydrazine sind hygroskopische, in Wasser leicht lösliche, ammoniakähnlich riechende unzersetzt flüchtige Flüssigkeiten. Die aromatischen und die gemischten Hydrazine sind teils flüssig, teils fest. Sie sind im luftverdünnten Raum meist unzersetzt flüchtig. Die symmetrischen aromatischen Hydrazine zersetzen sich beim Erhitzen.

Alkylhydrazine	Primär		Asymm. sekundär		Symm. sekundär	
	Fp.	Sdp.	Fp.	Sdp.	Fp.	Sdp.
Methyl	fl.	87°	fl.	62°	fl.	81°
Aethyl	fl.	100°	fl.	97°	fl.	85°
Phenyl	23°	241°	34°	220° (50 mm)	131°	Zersetzung
Methylphenyl	—	—	fl.	131° (35 mm)	fl.	—
Aethylphenyl	—	—	fl.	230°	fl.	unzersetzt

Gegen Reduktionsmittel sind die Alkylhydrazine recht beständig. Erst bei sehr kräftiger Reduktion werden sie zwischen den beiden Stickstoffatomen gespaltet. Trotzdem wirken sie zuweilen (s. S. 307) als Oxydationsmittel. Andererseits werden sie von Oxydationsmitteln sehr leicht angegriffen. Die primären Hydrazine reduzieren Fehlingsche Lösung schon in der Kälte, die Dialkylhydrazine in der Wärme.

Die primären Hydrazine können durch Oxydationsmittel unter Stickstoffentwickelung in die zugrunde liegenden aromatischen oder aliphatischen Kohlenwasserstoffe übergeführt werden. Die aromatischen primären Hydrazine geben hierbei als Zwischenprodukte Diazoverbindungen. Die aromatischen und fettaromatischen symmetrischen Dialkylhydrazine werden außerordentlich leicht zu Azokörpern oxydiert. Die aliphatischen symmetrischen Dialkylhydrazine werden durch Oxydation leicht gespaltet, so

liefert symmetrisches Diäthylhydrazin mit Quecksilberoxyd unter Stickstoffentwickelung Quecksilberdiäthyl. Die asymmetrischen Dialkylhydrazine liefern bei vorsichtiger Oxydation mit Quecksilberoxyd Tetrazone (s. den Artikel „Azokörper")

$$2(CH_3)_2N.NH_2 + 2O = (CH_3)_2N.N:N.N(CH_3)_2 + 2H_2O$$

bei stärkerer Oxydation sekundäre Amine und Stickstoff.

Mit salpetriger Säure liefern die primären aromatischen Hydrazine Diazoimide (siehe den Artikel „Azokörper") unter intermediärer Bildung unbeständiger Nitrosoverbindungen

$$C_6H_5.NH\,NH_2 \longrightarrow C_6H_5.N\begin{matrix}\diagup NO\\ \diagdown NH_2\end{matrix} \longrightarrow C_6H_5\,N\begin{matrix}\diagup N\\ \diagdown \|\\ N\end{matrix}$$

Die asymmetrischen Dialkylhydrazine liefern mit salpetriger Säure Stickoxydul und sekundäre Amine bezw. Nitrosamine. Die symmetrischen aromatischen Dialkylhydrazine liefern mit salpetriger Säure unbeständige Nitrosoverbindungen, die leicht in Azokörper übergehen, während die aliphatischen symmetrischen Dialkylhydrazine leicht unter Bildung von Alkylnitrit gespaltet werden.

Eigenartig ist das Verhalten der Hydrazine gegen Halogenalkyle. Die primären aliphatischen Hydrazine tauschen bei weiterer Alkylierung nur das eine, an dem schon alkylierten Stickstoffatom stehende Wasserstoffatom gegen Alkyl aus, liefern also nur asymmetrische Dialkylhydrazine, während primäre aromatische Hydrazine beide möglichen Arten von Dialkylhydrazinen liefern, vorwiegend allerdings ebenfalls das asymmetrische Produkt. Symmetrische Dialkylhydrazine liefern weiterhin Trialkylhydrazine. Die asymmetrischen Dialkylhydrazine lassen sich nicht direkt weiter alkylieren (wohl aber indirekt s. S. 302), sondern lagern nun an das tertiäre Stickstoffatom ein Molekül Halogenalkyl an und bilden quartäre Azoniumsalze

$$\begin{matrix}C_6H_5\\C_2H_5\end{matrix}\!>\!N-NH_2 + C_2H_5J \longrightarrow \begin{matrix}C_6H_5\\C_2H_5\end{matrix}\!>\!\underset{C_2H_5\ \ J}{N}-NH_2$$

Dieselben sind den quartären Ammoniumsalzen (s. S. 370, 371, 373 u. 375) völlig analog, d. h. sie werden durch wässerige Kalilauge nicht zersetzt, liefern aber mit feuchten Silberoxyd die stark basischen Azoniumhydroxyde. Auch die Trialkylhydrazine liefern mit Halogenalkyl vorwiegend quartäre Azoniumverbindungen (s. S. 302) neben Tetraalkylhydrazinen, die ihrerseits nicht mehr befähigt sind, quartäre Verbindungen zu liefern, sondern zwischen den beiden Stickstoffatomen gespaltet werden.

Benzidinumlagerung. Von großer theoretischer und praktischer Wichtigkeit ist eine eigenartige Umlagerung, die die Hydrazoverbindungen meist bei Gegenwart von Mineralsäuren erleiden. Bei dieser sogenannten Benzidinumlagerung gehen die Hydrazoverbindungen in überwiegender Menge in pp-Diaminodiphenylderivate über. Das Hydrazobenzol liefert so das pp-Diaminodiphenyl oder Benzidin

$$H\langle C_6H_4\rangle-NH-NH-\langle C_6H_4\rangle H \longrightarrow NH_2\langle C_6H_4\rangle-\langle C_6H_4\rangle NH_2$$

daneben aber auch kleine Mengen des stellungsisomeren op-Diaminodiphenyls oder Diphenylins.

$$H\langle C_6H_4\rangle-NH-NH-\langle C_6H_4\rangle H \longrightarrow H_2N\langle C_6H_4\rangle-\langle C_6H_4\rangle \ (NH_2)$$

Die „Benzidinumlagerung" tritt bei allen Derivaten des Hydrazobenzols ein, in denen die beiden p-Stellungen in den Benzolkernen frei sind. Die so entstehenden Benzidinbasen sind von großer Wichtigkeit für die Farbstofftechnik.

Ist eine oder sind beide p-Stellungen besetzt, so kann Benzidinumlagerung natürlich nicht eintreten. An ihre Stelle tritt dann je nach der Art der störenden Substituenten eine andere Umlagerung, die zuweilen zu stellungsisomeren Diaminodiphenylderivaten von der Art des Diphenylins führt. Häufiger tritt aber in diesen Fällen eine Umlagerung ein, die nicht zu Diphenylderivaten, sondern zu Diphenylaminderivaten führt, indem gewissermaßen nur die eine Hälfte des Hydrazobenzols der Umlagerung anheimfällt. Diese Art der Umlagerung bezeichnet man als Semidinumlagerung, d. h. als halbe Benzidinumlagerung. Sie kann wiederum nach zwei verschiedenen Richtungen verlaufen und entweder zu o-Aminodiphenylaminderivaten (I) oder zu p-Aminodiphenylaminderivaten (II) führen

$$\text{I.}\quad X.\langle C_6H_4\rangle-NH-NH-\langle C_6H_5\rangle H \longrightarrow X\langle C_6H_4\rangle-NH-\langle C_6H_4\rangle \ (NH_2)$$

$$\text{II.}\quad X\langle C_6H_4\rangle-NH-NH-\langle C_6H_4\rangle H \longrightarrow X\langle C_6H_4\rangle-NH-\langle C_6H_4\rangle-NH_2$$

Man unterscheidet danach Orthosemidinumlagerung (I) und Parasemidinumlagerung (II).

Sind im Ausgangsmaterial beide p-Stellungen besetzt, so ist natürlich nur Orthosemidinumlagerung möglich. Anderenfalls können beide Arten der Semidinumlagerung nebeneinander eintreten. Zuweilen tritt auch bei den Hydrazobenzolen mit freien p-Stellungen neben der Benzidinumlagerung Semidinumlagerung ein.

Besonders häufig angewendet wird noch die Fähigkeit aller derjenigen Hydrazinderivate, welche noch eine intakte NH_2-Gruppe besitzen, mit Aldehyden und Ketonen unter Wasserabspaltung zu reagieren. Die hierbei entstehenden „Hydrazone" werden weiter unten (s. S. 305) besprochen. Bei weitem das wichtigste Alkylhydrazin ist das Phenylhydrazin.

β) Säurehydrazide. Treten in das Hydrazin Acidylgruppen ein, so entstehen die Säurehydrazide, die den Säureamiden analog sind. Natürlich kann man theoretisch in das Hydrazinmolekül bis vier Acidylgruppen eingeführt denken, wobei die gleichen Isomeriefälle denkbar sind wie bei den Alkylhydrazinen (s. S. 300). Da aber bisher nur die Monoacylhydrazine und die symmetrischen Diacylhydrazine mit Sicherheit bekannt und näher untersucht sind, soll hier nur von diesem die Rede sein. Bei diesen Hydraziden ist dieselbe Tautomerie möglich, wie bei den Säureamiden (s. S. 278), doch ist hierüber noch nichts Näheres bekannt. Man formuliert diese Verbindungen allgemein als wahre Hydrazide

$$X.C\begin{matrix}\diagup O\\ \diagdown NH.NH_2\end{matrix} \quad \text{und} \quad X.C\begin{matrix}\diagup O \\ \diagdown NH-NH \diagup\end{matrix}\begin{matrix}O\diagdown\\ \end{matrix}C.X$$

Die Darstellung der Säurehydrazide geschieht ebenfalls analog der der Säureamide, d. h. durch Einwirkung von Hydrazinhydrat auf Ester, Chloride oder Anhydride der Säuren. Auf diese Weise erhält man zunächst die primären Hydrazide. Auch Säureamide können in Hydrazide übergeführt werden. Läßt man überschüssigen Säureester, -anhydride usw. bei höherer Temperatur auf die primären Hydrazide oder auch auf Hydrazinhydrat einwirken, so erhält man namentlich in der aliphatischen Reihe symmetrische sekundäre Hydrazide. Außerdem gehen die primären Säurehydrazide beim Eintragen von Jod in die alkoholische Lösung unter Stickstoffentwicklung in Diacylhydrazine über

$$\begin{matrix}X.CO.NH.NH_2\\ X.CO.NH.NH_2\end{matrix} + 2J_2 = \begin{matrix}X.CO.NH\\ |\\ X.CO.NH\end{matrix} + N_2 + 4HJ.$$

Symmetrisches Dibenzoylhydrazin entsteht auch aus Monobenzoylhydrazin durch längeres Erhitzen auf 180°. Die primären Hydrazide der niedrigeren Fettsäuren entstehen ferner aus den Hydrazinsalzen dieser Säuren beim Erhitzen, ebenso wie die Amide aus dem Ammoniaksalzen.

Die Säurehydrazide sind kristallinische, im luftverdünnten Raum meist unzersetzt destillierbare Körper.

Hydrazide	Primär		Symm. sekundär	
	Fp.	Sdp.	Fp.	Sdp.
Formyl	54°	—	160°	—
Acetyl	67°	—	138°	209° (15 mm)
Benzoyl	112°	fast unzers.	238°	—

Die primären Hydrazide reduzieren ammoniakalische Silberlösung in der Kälte. Die primären aliphatischen Hydrazide besitzen basische Eigenschaften, indem sie mit einem oder zwei Molekülen einer einbasischen Säure Salze bilden. Außerdem kann man aber in den primären und sekundären Säurehydraziden ein oder zwei Wasserstoffatome gegen Alkalimetalle austauschen.

Die Säurehydrazide werden vielfach zur Synthese heterozyklischer Verbindungen und zwar der Diazole, Triazole und Tetrazine benutzt.

Primäre Säurehydrazide liefern mit salpetriger Säure die sogenannten Säureazide

$$X.CO.NH.NH_2 + HO.NO = X.CO.N\begin{matrix}\diagup N\\ \|\\ \diagdown N\end{matrix}$$

die als Derivate der Stickstoffwasserstoffsäure im Artikel „Azokörper" behandelt werden. Die Hydrazide αβ-ungesättigter Säuren liefern mit salpetriger Säure keine Azide sondern Nitrosopyrazolidone, d. h. heterozyklische Verbindungen.

Den substituierten Säureamiden entsprechen alkylierte Säurehydrazide, bei denen wiederum die vorher (S. 289) auseinandergesetzten Isomeriefälle möglich sind. Sie entstehen entweder durch Alkylierung der primären und sekundären Säurehydrazide oder ihrer Natriumverbindungen (s. S. 301 und 302) oder durch Acylierung der Alkylhydrazine. Besonders wichtig sind die Acidylderivate des Phenylhydrazins, von denen eine außerordentlich große Anzahl bekannt ist.

Wenn man Phenylhydrazin mit Säureestern, -chloriden oder -anhydriden behandelt, tritt zunächst eine Acylgruppe in die intakte NH_2-Gruppe, d. h. es entstehen symmetrische Hydrazide (β-Hydrazide)

$$C_6H_5.NH.NH_2 + Cl.CO.X = C_6H_5.NH.NH.CO\,X + HCl$$

Bei weiterer Acylierung tritt ein zweiter Säurerest an das phenylierte Stickstoffatom (αβ-Hydrazide)

$$C_6H_5.NH.NH.CO.X + Cl.COX = \begin{matrix} C_6H_5 \\ X.CO \end{matrix} \Big> N \; NH.CO.X + HCl$$

Wenn man diese diacylierten Phenylhydrazine mit verdünnter Schwefelsäure kocht, wird nur die in β-Stellung stehende Acylgruppe abgespaltet und man erhält asymmetrische Hydrazide (α-Hydrazide)

$$\begin{matrix} C_6H_5 \\ X.CO \end{matrix} \Big> N.NH.CO.X + H_2O = \begin{matrix} C_6H_5 \\ X.CO \end{matrix} \Big> N.NH_2 + X.COOH$$

Letztere kann man auch direkt aus Natriumphenylhydrazin mit Säurechloriden oder -anhydriden gewinnen.

Symmetrische Phenylhydrazide geben mit Eisenchlorid und konzentrierter Schwefelsäure rote bis blauviolette Färbungen (Bülowsche Reaktion), asymmetrische dagegen nicht. Diese Reaktion beruht wahrscheinlich auf der Bildung von „Hydrotetrazonen" (vgl. den Artikel „Azokörper"). Die symmetrischen Phenylhydrazide reduzieren Fehlingsche Lösung.

Die Phenylhydrazide werden ebenfalls außerordentlich häufig zur Synthese heterozyklischer Verbindungen (der Diazole, Triazole und Tetrazine, insbesondere aber der Pyrazole) benutzt.

γ) Hydrazone, Azine und Osazone. Das Hydrazin selbst und alle seine Derivate, in denen noch eine NH_2 Gruppe intakt ist, reagieren mit Aldehyden und Ketonen im gleichen Sinne wie das Hydroxylamin (s. S. 293), d. h. unter Wasserabspaltung. Die so entstehenden Alkylidenhydrazine bezeichnet man als Hydrazone und zwar je nach ihrer Herkunft als Aldehydrazone (Aldehydhydrazone) oder Ketohydrazone.

$$\begin{matrix} X \\ Y \end{matrix} \Big> C : O + H_2N . N \Big< \begin{matrix} Z \\ U \end{matrix} = \begin{matrix} X \\ Y \end{matrix} \Big> C : N . N \Big< \begin{matrix} Z \\ U \end{matrix} + H_2O$$

Das Hydrazin selbst, das ja zwei NH_2-Gruppen besitzt, kann die gleiche Reaktion zweimal eingehen. Hierbei entstehen Dialkylidenhydrazine, die man als Azine und zwar als Aldazine oder Ketazine bezeichnet.

$$\begin{matrix} \begin{matrix} X \\ Y \end{matrix} \Big> C:O \\ \begin{matrix} X \\ Y \end{matrix} \Big> C:O \end{matrix} + \begin{matrix} H_2N \\ | \\ H_2N \end{matrix} = \begin{matrix} \begin{matrix} X \\ Y \end{matrix} \Big> C:N \\ | \\ \begin{matrix} X \\ Y \end{matrix} \Big> C:N \end{matrix} + 2H_2O$$

Die nichtsubstituierten Hydrazone entstehen, wenn man Aldehyde oder Ketone mit überschüssigem Hydrazinhydrat behandelt. Sie sind flüssige oder niedrig schmelzende, unzersetzt destillierbare Körper, die aber außerordentlich leicht in Azine übergehen. Nichtsubstituierte aliphatische Aldehydrazone kennt man noch gar nicht. Die Azine, die man direkt durch Umsetzung von zwei Molekülen Aldehyd oder Keton mit einem Molekül Hydrazinhydrat erhält, sind beständige Körper, die in der aliphatischen Reihe unzersetzt sieden, während Benzaldazin beim Erhitzen in Stickstoff und Stilben zerfällt (vgl. den Artikel „Azine").

Dialdehyde und anatoge Verbindungen können heterozyklische Azine liefern. So leitet sich vom Phtalaldehyd das sogenannte Phtalazin

$$C_6H_4 \Big< \begin{matrix} CH = N \\ | \\ CH = N \end{matrix}$$

ab.

Bis vor kurzem nahm man an, daß gewisse Diketone und Ketosäuren mit Hydrazin Kondensationsprodukte anomaler Konstitution (Hydraziverbindungen) liefern, so z. B. Brenztraubensäure $CH_3.CO.COOH$ die sogenannte Hydraziessigsäure.

$$\begin{matrix} CH_3 & & COOH \\ & C & \\ NH & - & NH \end{matrix}$$

In neuster Zeit sind aber diese Verbindungen als normale Hydrazone erkannt worden.

Sehr viel wichtiger als diese Verbindungen sind die substituierten Hydrazone, die sich aus Aldehyden oder Ketonen mit einfach substituierten oder asymmetrisch disubstituierten Hydrazinen unter Wasseraustritt bilden. Unter diesen wiederum ist eine bestimmte Gruppe von hervorragender Wichtigkeit. Es sind das die aus Phenylhydrazin mit den verschiedensten Aldehyden oder Ketonen entstehenden Phenylhydrazone deren Erforschung wir hauptsächlich Emil Fischer verdanken. Von diesen soll hier ausschließlich die Rede sein, weil das von ihnen Gesagte ohne weiteres auf die Derivate anderer Monoarylhydrazine übertragbar ist, während andererseits die Derivate der aliphatischen Hydrazine kaum bekannt und wenig wichtig sind.

Die Phenylhydrazone der Monoaldehyde und Monoketone sowie der Monoaldehydosäuren und Monoketosäuren entstehen gewöhnlich ganz glatt beim Erwärmen der Komponenten in essigsaurer Lösung. Es sind im allgemeinen gut kristallisierende, leicht in reiner Form zu gewinnende Körper, die sich zur Identifizierung und zur quantitativen Bestimmung der Aldehyde und Ketone vorzüglich eignen. Weniger gut gelingt es, die zugrunde liegenden Aldehyde oder Ketone aus ihnen zurück-

zugewinnen, weil ihre Spaltung gewöhnlich nicht sehr glatt verläuft.

Die Phenylhydrazone lassen sich in mannigfaltigster Weise zur Darstellung von heterozyklischen Verbindungen, so von Indolen, Pyrrolen, Pyrazolen, Triazolen und Tetrazonen benutzen.

In manchen Fällen hat sich die Verwendung anderer Hydrazine an Stelle des Phenylhydrazins für die Gewinnung von Hydrazonen als vorteilhafter erwiesen. Namentlich sind p-Nitrophenylhydrazin und β-Naphtylhydrazin, dann aber auch die asymmetrischen Dialkylhydrazine Diphenyl-, Methylphenyl- und Benzylphenylhydrazin hierfür benutzt worden. Auch das Semicarbazid (s. S. 308) dient oft dem gleichen Zweck.

Bei den Hydrazonen sind dieselben Vorbedingungen für das Auftreten von Stereoisomerie gegeben, wie bei den Oximen (s. S. 294), auch sind einige Phenylhydrazone in der Tat in zwei verschiedenen Formen erhalten worden, doch ist die Stereoisomerie der Hydrazone noch nicht sehr eingehend untersucht.

Die Schmelz- und Siedepunkte einiger einfacher Hydrazone, Azine und Phenylhydrazone gibt folgende Tabelle.

	Hydrazon		Azin		Phenylhydrazon	
	Fp.	Sdp.	Fp.	Sdp.	Fp.	Sdp.
Acetaldehyd	unbekannt		fl.	96°	65° [1]	140° (20 mm)
Benzaldehyd	16°	140° (14 mm)	93°	Zersetzung	152° [2]	—
Aceton	fl.	125°	fl.	132°	16°	165° (91 mm)
Benzophenon	98°	—	162°	—	137°	—

[1]) Streeoisomeres: Fp. 101°. [2]) Stereoisomeres: Fp. 136°.

Sehr interessante Eigentümlichkeiten im Gegensatz zu den eben besprochenen einfachen Phenylhydrazonen zeigen in mancher Hinsicht die Phenylhydrazone der Dialdehyde, Diketone, Aldehydoketone und schließlich der Ketodikarbonsäuren. Verbindungen, welche zwei Carbonylgruppen enthalten, können natürlich je nach den Bedingungen mit einem oder mit zwei Molekülen Phenylhydrazin reagieren. Im ersteren Fall entstehen Monohydrazone (Ketohydrazone), im letzteren Falle Dihydrazone. Diejenigen Dihydrazone, in denen die beiden Hydrazinreste an benachbarten Kohlenstoffatomen stehen, bezeichnet man als Osazone. Die Monohydrazone kann man natürlich in normaler Weise aus den betreffenden Dicarbonylverbindungen mit der berechneten Menge Phenylhydrazin darstellen. Außerdem entstehen sie aber auch bei Reaktionen, bei denen man ganz andere Körper erwarten sollte. Zum Verständnis dieser Reaktionen sei daran erinnert, daß die wichtigste Darstellungsmethode der Azokörper (s. diese) darauf beruht, daß sich Diazoverbindungen mit gewissen aromatischen Verbindungen „kuppeln" lassen. Nun lassen sich Diazoverbindungen auch mit gewissen aliphatischen Verbindungen kuppeln. Hierzu befähigt sind z. B. alle diejenigen aliphatischen Verbindungen, welche eine CH_2-Gruppe zwischen zwei CO-Gruppen besitzen, also die β-Diketone, die β-Ketosäureester und der Malonester. Kuppelt man nun z. B. Malonester mit Diazobenzollösung, so entsteht Benzolazomalonester

$$C_6H_5.N:N.OH + H_2C\langle^{CO_2C_2H_5}_{CO_2C_2H_5}$$
$$= C_6H_5.N:N.CH\langle^{CO_2C_2H_5}_{CO_2C_5H_5} + H_2O$$

Die hieraus durch Verseifung entstehende Benzolazomalonsäure ist nun merkwürdigerweise identisch mit dem auf normale Weise hergestellten Phenylhydrazon der Mesoxalsäure

$$C_6H_5.NH.NH_2 + OC\langle^{COOH}_{COOH}$$
$$= C_6H_5.NH.N:C\langle^{COOH}_{COOH} + H_2O$$

Zwischen diesen beiden Körpern liegt also Tautomerie vor im Sinne der beiden Formeln

$$C_6H_5.N{=}N.\overset{\overset{H}{|}}{C}(COOH)_2 \rightleftarrows C_6H_5.\overset{\overset{H}{|}}{N}.N{=}C(COOH)_2$$

In gleicher Weise ist Benzolazoacetessigester identisch mit dem α-Monophenylhydrazon des Diketobuttersäureesters und dieselbe Tautomerie findet sich in analogen Fällen immer wieder. Ueber die Frage, ob diese Verbindungen in freiem Zustande Azostruktur oder Phenylhydrazonstruktur besitzen, ist lange diskutiert worden, doch neigt man jetzt dazu (soweit man nicht alle tautomeren Verbindungen als Gleichgewichtsgemische beider Formen ansieht), diese „fettaromatischen Azokörper" als wahre Phenylhydrazone aufzufassen, (im Gegensatz zu den von Chinonen abgeleiteten Derivaten, von denen gleich noch die Rede sein wird).

Für diese Auffassung spricht die große Tendenz einer derartig gebundenen Azogruppe, in die tautomere Hydrazonform überzugehen, die sich darin zeigt, daß bei der Einwirkung von Diazobenzolhydrat auf Methylacetessigester nicht eine Azoverbindung entsteht, sondern unter Abspaltung der Acetylgruppe das Phenylhydrazon des Brenztraubensäureesters

$$C_6H_5.N:NOH + HC.COOC_2H_5 \text{ (mit } CO.CH_3 \text{ und } CH_3\text{)}$$

$$\longrightarrow C_6H_5.N{-}N{=}C{-}COOC_2H_5 \text{ (mit } CH_3\text{)} + HOCO.CH_3$$

Die Reaktion verläuft analog der Einwirkung salpetriger Säure auf Alkylacetessigester (s. S. 295). Uebrigens hat man trotz der jetzigen Auffassung die alte Bezeichnungsweise aus Bequemlichkeit vielfach beibehalten, bezeichnet also z. B. das Monophenylhydrazon des Diketobuttersäureesters immer noch als Benzolazoacetessigester usw. Es möge noch hervorgehoben werden, daß die besagte Tautomerie nur bei Nachbarschaft ungesättigter Gruppen, wie CO, NO_2 u. a. auftritt. Benzolazoäthan läßt sich z. B. zwar in Acetaldehydphenylhydrazon umlagern, beides sind aber selbständige wohlcharakterisierte und durchaus verschiedene Körper.

$C_6H_5.N:N.CH_2.CH_3$ — Benzolazoäthan

$C_6H_5.NH.N:CH.CH_3$ — Acetaldehydphenylhydrazon.

Auch die Monophenylhydrazone der Chinone zeigen eine derartige Tautomerie, die übrigens der bei den Chinonmonoximen (S. 298) beobachteten Tautomerie analog ist. Zwar kann man das Chinonmonophenylhydrazon nicht aus Chinon und Phenylhydrazin herstellen, weil Chinon von Phenylhydrazin reduziert wird. Wohl aber kann man aus Chinon und α-Acetyl- oder α-Benzoylphenylhydrazin Chinonacidylphenylhydrazone erhalten und diese liefern durch Abspaltung des Säurerestes dieselbe Verbindung, die durch Kuppeln von Diazobenzolhydrat und Phenol entsteht, d. h. p-Oxyazophenol.

O ‖ (Chinonring) ‖ O → N—N(Ac)(C₆H₅) ‖ (Ring) ‖ O → N—NH.C₆H₅ ‖ (Ring) ‖ O

⇅

$C_6H_5.N_2.OH +$ (Phenol, OH) → $N = N.C_6H_5$ (Ring) OH

Die p-Chinonmonophenylhydrazone sind also tautomer mit den p-Oxyazoverbindungen und in gleichem Sinne hat man auch für die o-Oxyazokörper die tautomeren Formeln von o-Chinonmonophenylhydrazonen in Betracht zu ziehen.

(Ring) OH, $N{=}N.C_6H_5$ → (Ring) O, $N{-}N.C_6H_5$ (H)

Was nun die Frage anbetrifft, ob die freien Verbindungen Hydrazone oder Oxyazokörper sind, so haben sich nach den neuesten Untersuchungen die Verbindungen der Benzol- und Naphtalinreihe im Gegensatz zu den fettaromatischen Körpern tatsächlich als Azoverbindungen erwiesen. Für eine Reihe von analogen Substanzen, die sich von anderen isozyklischen oder heterozyklischen Stammkörpern ableiten, ist die Konstitution von Fall zu Fall verschieden (vgl. den Artikel „Azokörper").

Behandelt man die Monophenylhydrazone von Dicarbonylverbindungen weiter mit Phenylhydrazin, so entstehen Dihydrazone, die man, wie schon erwähnt, bei Nachbarstellung der beiden Hydrazinreste als Osazone bezeichnet. Speziell für diese Osazone hat man nun durch die Arbeiten Emil Fischers noch eine charakteristische weitere Bildungsweise kennen gelernt, die insbesondere für die Erkenntnis der Zuckerarten von großer Wichtigkeit geworden ist. Osazone entstehen nämlich auch, wenn man auf die Oxyketone oder α-Oxyaldehyde überschüssiges Phenylhydrazin einwirken läßt.

Diese Reaktion erklärt sich folgendermaßen. Läßt man z. B. auf Traubenzucker zunächst ein Molekül Phenylhydrazin einwirken, so entsteht das normale Phenylhydrazon.

$$HC{=}O \,|\, HCOH \,|\, (HCOH)_3 \,|\, CH_2OH + H_2N.NHC_6H_5 = H.C{=}N.NH.C_6H_5 \,|\, HCOH \,|\, (HCOH)_3 \,|\, CH_2OH + H_2O$$

Erwärmt man dieses nun mit überschüssigem Phenylhydrazin, so wirkt ein Molekül des letzteren auf die der Hydrazongruppe benachbarte Alkoholgruppe oxydierend, indem es selbst in Anilin und Ammoniak zerfällt. Aus der Alkoholgruppe wird hierbei eine Ketogruppe,

$$H.C = N.NH.C_6H_5 \,|\, HCOH \,|\, (HCOH)_3 \,|\, CH_2OH + C_6H_5NH.NH_2 =$$

$$H.C{=}N.NH.C_6H_5 \,|\, C{=}O \,|\, (HCOH)_3 \,|\, CH_2OH + C_6H_5NH_2 + NH_3$$

und diese neuentstandene Ketogruppe reagiert schließlich mit einem dritten Molekül Phenylhydrazin in normaler Weise.

$$\begin{array}{l} H.C=N.NH.C_6H_5 \\ C=O \\ | \\ (HCOH)_3 \\ CH_2OH \end{array} + H_2N.NHC_6H_5 = \begin{array}{l} H.C=N.NH.C_6H_5 \\ C=N.NH.C_6H_5 \\ | \\ (HCOH)_3 \\ CH_2OH \end{array} + H_2O$$

Bei den Ketozuckern, in denen ja der Ketogruppe eine primäre und eine sekundäre Alkoholgruppe benachbart stehen, wird erstere in die Reaktion mit hineingezogen, so daß Fruchtzucker dasselbe Phenylosazon liefert, wie Traubenzucker.

$$\begin{array}{l} H_2C.OH \\ C=O \\ | \\ H(COH)_3 \\ CH_2OH \end{array} \longrightarrow \begin{array}{l} H.C=N.NH.C_6H_5 \\ C=N.NH.C_6H_5 \\ (HCOH)_3 \\ CH_2OH \end{array}$$

Die Phenylosazone sind gelbe gut kristallisierende Verbindungen, die für die Isolierung der Zuckerarten von größter Wichtigkeit sind und die Umwandlung der Aldosen in Ketosen ermöglicht haben. Durch Salzsäure werden sie in Phenylhydrazin und die zugrundeliegenden Polyoxyketoaldehyde, die sogenannten Osone gespaltet.

Für die Trennung von Aldosen und Ketosen ist es wichtig, daß α-Methylphenylhydrazin (und andere asymmetrische Alkylphenylhydrazine) nur mit den Ketosen die gelben Osazone, mit den Aldosen dagegen nur einfache farblose Hydrazone liefert. Durch Oxydation werden zahlreiche Osazone in rotgefärbte heterozyklische Verbindungen, die sogenannten Osotetrazone übergeführt (vgl. den Artikel „Kohlehydrate").

δ) Gemischte Hydrazinderivate. Von den Diketonen leiten sich Derivate ab, die gleichzeitig Oxim und Hydrazon sind, die sogenannten Hydrazoxime. Mit demselben Namen belegt man auch einige Verbindungen, welche eine Oximinogruppe und einen Hydrazinrest am gleichen Kohlenstoff enthalten $X.C\begin{smallmatrix}\diagup NH.NH.C_6H_5, \\ \diagdown NOH\end{smallmatrix}$ welche also den Amidinen und Amidoximen entsprechen. Auch einige Hydrazidine oder Amidrazone, Körper, welche eine Iminogruppe und eine Hydrazinogruppe enthalten:

$$X.C\begin{matrix}\diagup NH.NHC_6H_5 \\ \diagdown NH\end{matrix}$$

sowie den Imidchloriden analog gebaute Hydrazonchloride

$$X.C\begin{matrix}\diagup Cl \\ \diagdown N.NH.C_6H_5\end{matrix}$$

kennt man in der aromatischen Reihe, doch sind alle derartigen Verbindungen ohne größere Bedeutung. Wichtig sind dagegen einige Verbindungen, die sich von der Kohlensäure und Thiokohlensäure ableiten. Namentlich das sogenannte Semicarbazid, das Amidhydrazid der Kohlensäure bezw. das Hydrazid der Carbaminsäure (s. S. 279),

$$O=C\begin{matrix}\diagup NH_2 \\ \diagdown NH.NH_2\end{matrix}$$

wird vielfach als Erkennungsmittel für Aldehyde und Ketone verwandt, mit denen es vermöge seiner Hydrazingruppe ebenso reagiert wie Phenylhydrazin. Die entstehenden Kondensationsprodukte

$$\begin{matrix}X \diagdown \\ Y \diagup\end{matrix} C = N.NH \quad C\begin{matrix}\diagup O \\ \diagdown NH_2\end{matrix}$$

nennt man Semicarbazone. Sie sind meist vorzüglich kristallisierende leicht isolierbare Körper. Das Semicarbazid selbst ist eine Base, die in Form ihres Chlorhydrats angewendet wird. Das Semicarbazid entsteht aus Harnstoff beim Erhitzen mit Hydrazinhydrat, aus Kaliumcyanat mit Hydrazinsulfat und durch Spaltung des gleich noch zu erwähnenden Aminoguanidins. Die Bildung von Alkylsemicarbaziden aus Nitrosoalkylharnstoffen ist schon bei anderer Gelegenheit (S. 301) besprochen worden.

An Stelle des Semicarbazids verwendet man zur Erkennung von Aldehyden und Ketonen auch das analoge Thiosemicarbazid und das schon genannte Aminoguanidin $NH:C<\begin{smallmatrix}NH.NH_2, \\ NH_2\end{smallmatrix}$ das gleichzeitig Amid, Imid und Hydrazid ist und durch Reduktion von Nitrosoguanidin gewonnen wird. Die Kondensationsprodukte des Aminoguanidins mit Aldehyden und Ketonen sind an sich wenig beständig, liefern aber gut kristallisierende Salze, namentlich Pikrate.

Hierher gehören auch die sogenannten Formazylverbindungen, Körper, die gleichzeitig Hydrazone und Azokörper sind.

$$X.C\begin{matrix}\diagup N=N.C_6H_5 \\ \diagdown N \quad NH.C_6H_5\end{matrix}$$

Sie entstehen bei der Einwirkung von Diazobenzolhydrat auf solche Phenylhydrazone, welche an dem den Hydrazonrest tragenden Kohlenstoffatom noch Wasserstoff oder eine leicht abspaltbare Gruppe enthalten, also auf Phenylhydrazone $\begin{smallmatrix}X \\ Y\end{smallmatrix}>C=N.NHC_6H_5$, in denen Y Wasserstoff, Carboxyl oder Acetyl ist. So liefert Acetaldehydphenylhydrazon oder Brenztraubensäurephenylhydrazon Methylformazyl

$$CH_3C\begin{matrix}\diagup H \\ \diagdown N.HHC_6H_5\end{matrix} + HO.N:N.C_6H_5 = CH_3-C\begin{matrix}\diagup N=NC_6H_5 \\ \diagdown N \quad NHC_6H_5\end{matrix}$$

Da nun Phenylhydrazone der gedachten Art häufig aus Diketonen, Ketosäureestern und ähnlichen Verbindungen mit Diazobenzolhydrat ent-

stehen (s. S. 306), so geben derartige Carbonylverbindungen mit überschüssigem Diazobenzolhydrat direkt Formazylverbindungen. So liefert Aceton oder Acetessigsäure mit Diazobenzolhydrat direkt Formazylmethylketon

$$\begin{matrix} CH_3.CO \\ \\ HOOC \end{matrix} \!\!>\! CH_2 \rightarrow \begin{matrix} CH_3CO \\ \\ HOOC \end{matrix} \!\!\!>\! C{=}N.NHC_6H_5 \rightarrow$$

$$\begin{matrix} CH_3.CO \\ | \\ CO_2 + \; C{=}N.NHC_6H_5 \\ | \\ N{=}N.C_6H_5 \end{matrix}$$

Mit einem noch größeren Ueberschuß von Diazobenzolhydrat kann im Formazylmethylketon dann auch noch die Acetylgruppe durch einen Azorest verdrängt werden und es entsteht

Formazylazobenzol $C \begin{cases} N{=}N.C_6H_5 \\ N{-}NHC_6H_5 \\ N{=}N.C_6H_5 \end{cases}$

Die Formazylverbindungen sind dunkelrote gut kristallisierende Körper, deren Sulfosäuren Farbstoffe sind. Sie entstehen auch noch aus Hydraziden oder Hydrazonchloriden (s. S. 308) mit überschüssigem Phenylhydrazin, das hierbei wie bei der Osazonbildung (s. S. 307) gleichzeitig als Oxydationsmittel wirkt und einen Hydrazinrest zum Azorest oxydiert.

Zu den gemischten Verbindungen kann man auch noch die sogenannten Nitrazone (Nitrohydrazone) rechnen, die aus primären Nitroparaffinen bei der Einwirkung von Diazobenzolhydrat in der früher (S. 306) geschilderten Weise entstehen

$$CH_3.C \begin{cases} NO_2 \\ H \\ H \end{cases} \rightarrow \left[CH_3.C \begin{cases} NO_2 \\ H \\ N{-}NC_6H_5 \end{cases} \right]$$

Nitroäthan

$$\rightarrow CH_3.C \begin{cases} NO_2 \\ N{-}NHC_6H_5 \end{cases}$$

Nitroacetaldehydphenylhydrazon.

4. Beschreibung wichtiger Ammoniakderivate.[1]) Im folgenden sind einige Ammoniakderivate, die ihrer technischen Bedeutung, ihres Vorkommens in der Natur oder ihrer chemischen Konstitution wegen wichtig erscheinen, zusammengestellt. Fp. und Sdp. sind nur angegeben, wenn sie nicht bereits im vorstehenden Hauptkapitel mitgeteilt wurden.

1. Amine. Die Existenz der Amine wurde von Liebig vorausgesagt; ihre Darstellung geschah zuerst von Wurtz 1848 (primäre Amine), dann von A. W. Hofmann 1849 (primäre, sekundäre, tertiäre Amine und Ammoniumbasen).

Methylamin CH_3NH_2; findet sich in Mercurialis perennis und annua; im Knochenöl, im Holzdestillat; farbloses, ammoniakähnlich riechendes Gas; ist im Gegensatz zu Ammoniak an der Luft brennbar; bei 12° lösen sich 1150 Volume des Gases in 1 Volum H_2O; die Lösung löst die Oxyde von Cd, Co und Ni nicht (während wässeriges Ammoniak dies vermag); mit LiCl und AgCl bildet das Methylamin komplexe Verbindungen; entsteht bei der Zersetzung natürlicher Alkaloide (Thein, Kreatin, Morphin usw.).

Aethylamin $C_2H_5NH_2$; bewegliche Flüssigkeit, d^8 0,696; mit H_2O in allen Verhältnissen mischbar; verdrängt NH_3 aus Ammoniumsalzen; löst im Ueberschuß $Al(OH)_3$.

Isopropylamin $(CH_3)_2CH.NH_2$; findet sich im Weißdorn; sec. Butylamin $C_2H_5CH(CH_3)NH_2$ ist aus dem Oel von Cochlearea officinalis hergestellt worden.

Dimethylamin $(CH_3)_2NH$; gasförmig, in Wasser leicht löslich,

Diäthylamin $(C_2H_5)_2NH$; flüssig, mit Wasser mischbar.

Trimethylamin $(CH_3)_3N$; Vorkommen: in der Heringslake, deren charakteristischen Grund es bedingt; wird aus dieser oder durch Destillation von Melassenschlempe (s. Betain unten 9) gewonnen; bei gewöhnlicher Temperatur gasförmig; löslich in Wasser.

Tetramethylammoniumhydroxyd $(CH_3)_4N.OH$ bildet mit H_2O ein Pentahydrat (Fp. 63°), ein Trihydrat (Fp. 60°) und ein Monohydrat, das sich bei 130° zersetzt. Die Tetraalkylammoniumhydroxyde sind starke Basen; von ihren Salzen seien erwähnt: Tetramethylammoniumjodid $(CH_3)_4NJ$ und Tetraäthylammoniumjodid $(C_2H_5)_4NJ$, aus Wasser bezw. Alkohol als weiße Prismen kristallisierend. Durch Umsetzung mit AgCl erhält man die entsprechenden Chloride. Die Jodide addieren Jod.

Dimethyl-diäthyl-ammoniumjodid $(CH_3)_2(C_2H_5)_2NJ$ entsteht sowohl aus Dimethylamin und Aethyljodid wie auch aus Diäthylamin und Methyljodid; die Bildungsformeln

$$\begin{matrix} CH_3 \\ CH_3 \\ C_2H_5 \end{matrix} \!>\! N.C_2H_5J \text{ und } \begin{matrix} C_2H_5 \\ C_2H_5 \\ CH_3 \end{matrix} \!>\! N.CH_3J$$

entsprechen also demselben chemischen Individuum (dies spricht für eine atomistische [nicht molekulare] Verbindungsnatur der Ammoniumderivate und für die Gleichwertigkeit der fünf Stickstoffvalenzen; vgl. dazu die Artikel „Valenzlehre“, „Organische Chemie“ und „Akridingruppe“).

Phenylamin $C_6H_5NH_2$. Anilin (vgl. den Artikel „Benzolgruppe“); wurde 1826 von Unverdorben durch Destillation von Indigo erhalten („Krystallin“); 1834 von Runge im Steinkohlenteer entdeckt („Kyanol“); 1841 von Fritzsche durch Destillation von Indigo mit KOH („Anilin“ nach Indigofera anil) und von Zinin durch Reduktion von Nitrobenzol mittels Schwefelammonium („Benzidam“) erhalten. d^0 1,0361; löst sich in 31 Teilen Wasser von 12,5°. Anilin ist eine schwache Base, fällt aber Al und Fe(III)-Salze und verdrängt beim Erhitzen (wegen seiner geringeren Flüchtigkeit) NH_3 aus seinen Salzen; es ist giftig. Für viele Stoffe ist es ein gutes Lösungsmittel. Von Salzen des Anilins seien erwähnt: das Chlorhydrat $C_6H_5NH_2.HCl$ („Anilinsalz“ der Technik) weiße, stark triboluminescierende Blätter; dieses bildet Doppelverbindungen, z. B. ein Platinchloriddoppelsalz, gelbe Nadeln; auch das freie Anilin gibt Doppelverbindungen, z. B. mit Trinitrobenzol. — Anilin ist das Ausgangsprodukt für fast alle organischen Farbstoffe, für zahlreiche Arzneimittel u. a.

Toluidine $CH_3.C_6H_4.NH_2$; 3 Isomere: o-Toluidin (Sdp. 197°); m-Toluidin (Sdp. 199°)

[1]) Bearbeitet von K. Schaum.

und p-Toluidin (Fp. 48°, Sdp. 198°); werden in der Farbstofftechnik verwendet, z. B. zur Herstellung der Safranine, gewisser Triphenylmethanfarbstoffe usw.

Xylidine $(CH_3)_2C_6H_3.NH_2$; 6 Isomere; einige von ihnen dienen als Ausgangsprodukte für wichtige Azofarbstoffe.

Methylanilin $C_6H_5NHCH_3$; Sdp. 192°; d^{15} 0,976.

Dimethylanilin $C_6H_5N(CH_3)_2$; Fp. 0,5°; Sdp. 192°; d^{20}_4 0,9575; gibt mit salpetriger Säure p-Nitrosodimethylanilin $NO.C_6H_4N(CH_3)_2$ (grüne Blätter, Fp. 85°). Dimethylanilin dient zur Herstellung von Triphenylmethanfarbstoffen.

Diphenylamin $(C_6H_5)_2NH$; Fp. 54°; Sdp. 310°; wird durch Erhitzen von Anilin mit Anilinchlorhydrat auf 140° hergestellt; schwache Base; seine Lösung in H_2SO_4 färbt sich mit Säure von HNO_3 dunkelblau (Nachweis von HNO_3). Diphenylamin ist das Ausgangsprodukt für gewisse Rosanilin- und für die Thioninfarbstoffe.

Triphenylamin $(C_6H_5)_3N$; Fp. 127°; große Tafeln; bildet keine Salze.

Benzylamin $C_6H_5CH_2NH_2$; Sdp. 187°; in H_2O leicht löslich; ziemlich starke Base.

Naphtylamine $C_{10}H_7NH_2$; 2 Isomere: α-Naphtylamin, Fp. 50°, Sdp. 300°; flache Nadeln von stechendem Geruch, die sich an der Luft rot färben; bildet Salze, in deren Lösungen durch Oxydationsmittel (Ferrichlorid, Chromsäure usw.) ein blauer Niederschlag erzeugt wird; Ausgangsprodukt für gewisse Safraninfarbstoffe. — β-Naphtylamin, Fp. 112°, Sdp. 294°; geruchlos; die Salzlösungen werden durch Oxydationsmittel nicht gefärbt.

Ueber die Amine des Triphenylmethans s. „Triphenylmethangruppe" und „Farbstoffe".

2. Diamine.

Aethylendiamin $NH_2.(CH_2)_2.NH_2$; Fp. 8,5°, Sdp. 116,5°; riecht ammoniakähnlich und reagiert stark alkalisch; mit H_2O bildet es ein Hydrat vom Fp. 10° und Sdp. 118°; durch salpetrige Säure wird es in Aethylenoxyd $\begin{matrix}CH_2\\|\\CH_2\end{matrix}\!\!>\!O$ umgewandelt.

Tetramethylendiamin $NH_2(CH_2)_4NH_2$; Fp. 27° findet sich bei Cystinurie im Harn und in den Fäces (vielleicht identisch mit Putrescin).

Pentamethylendiamin $NH_2(CH_2)_5NH_2$; Sdp. 178°, ist identisch mit dem Verwesungsprodukt Cadaverin; isomer damit ist das Fäulnisprodukt Neuridin.

Phenylendiamine $C_6H_4(NH_2)_2$; o-Phenylendiamin, Fp. 102°, Sdp. 252°; wird in HCl-Lösung durch $FeCl_3$ dunkelrot gefärbt; m-Phenylendiamin, Fp. 63°, Sdp. 287°; dient zum Nachweis salpetriger Säure, mit der es Gelb- bis Braunfärbung gibt infolge Bildung von Bismarckbraun (Triamidoazobenzol, Ausgangsprodukt für braune Aminoazofarbstoffe); p-Phenylendiamin, Fp. 147°, Sdp. 267°; oxydiert sich an der Luft zu dem granatroten Tetraamido-diphenyl-p-azophenylen vom Fp. 230°; läßt sich leicht in Chinon oder Chinondichlorimid überführen; Ausgangsprodukt für Indamin-, Indophenol-, Safranin- und Lauthsche Farbstoffe.

p-Diamidodiphenyl $NH_2(C_6H_4)_2NH_2$ Benzidin; Fp. 122°; wird technisch durch Reduktion von Azobenzol und Umlagerung des entstandenen Hydrazobenzols (s. oben „Benzidinumlagerung") dargestellt. Ausgangsprodukt für die Benzidinazofarbstoffe.

3. Imine. a) Zyklische Amine.

Dimethylenimin $\begin{matrix}CH_2\\|\\CH_2\end{matrix}\!\!>\!NH$; Sdp. 55°; d^{20} 0,8321; farblose, stark ammoniakalisch riechende, ätzende Flüssigkeit; mischbar mit H_2O.

Trimethylenimin $CH_2\!<\!\begin{matrix}CH_2\\CH_2\end{matrix}\!>\!NH$; Sdp. 63°; d^{20} 0,8436;

Tetramethylenimin $\begin{matrix}CH_2.CH_2\\|\\CH_2.CH_2\end{matrix}\!\!>\!NH$, (Tetrahydropyrrol; Pyrrolidin); Sdp. 87°, riecht piperidinartig.

Pentamethylenimin $CH_2\!<\!\begin{matrix}CH_2.CH_2\\CH_2.CH_2\end{matrix}\!>\!NH$ (Hexahydropyridin, Piperidin) Sdp. 106°; besitzt unangenehmen, charakteristischen Geruch.

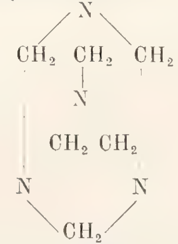
Diäthylendiamin $NH\begin{matrix}CH_2.CH_2\\CH_2.CH_2\end{matrix}NH$ (Hexahydropyrazin, Piperazin), Fp. 104°, Sdp. 145°; ist in Wasser löslich und hat stark basische Eigenschaften; wird als Harnsäure lösendes Mittel verwendet.

Trimethylentriamin

$$\begin{matrix} & NH & \\ CH_2 & & CH_2 \\ NH & —CH_2— & NH \end{matrix}$$

ist die Grundsubstanz des aus Ammoniak und Formaldehyd entstehenden

Hexamethylentriamin



(Urotropin, Formin); glänzende Rhomboëder, löslich in Wasser; findet als harnsäurelösendes Mittel Verwendung.

b) Eigentliche Imine.

Benzylidenimin $C_6H_5CH:NH$; das HCl-Salz entsteht beim Einleiten von HCl in Lösungen von Hydrobenzamid. Fp. 180°; wird durch H_2O in Benzaldehyd + NH_4Cl zerlegt.

4. Oxyamine.

a) Aldehydammoniake.

Aethylaldehydammoniak $CH_3CH(OH)NH_2$; Fp. 70—80°; wird aus ätherischer Aldehydlösung durch trockenes NH_3 abgeschieden; glänzende Rhomboeder, leicht löslich in H_2O. — Formaldehyd liefert mit NH_3 Hexamethylendiamin (s. oben), Benzaldehyd gibt Hydrobenzamid $\begin{matrix}C_6H_5CH:N\\C_6H_5CH:N\end{matrix}\!>\!CHC_6H_5$, das durch Umlagerung in das isomere Amarin übergeführt wird; dieses liefert durch Oxydation Lophin.

b) Oxalkylbasen (Hydramine).

Oxäthylamin $OH(CH_2)_2NH_2$ (Aminoäthylalkohol); Sdp. 171°; entsteht durch Addition von NH_3 an Aethylenoxyd. — In naher Beziehung zu höheren Homologen dieser Verbindung stehen:

Oxäthyltrimethylammoniumhydroxyd $OH.CH_2.CH_2.N(CH_3)_3OH$ (Cholin, Bilineurin, Sinkalin); an der Luft zerfließlich; stark alkalisch; ist im Tierorganismus sehr verbreitet [in der Rinds- und Schweinsgalle (χολή = Galle; „Cholin"); in der Nervensubstanz (νεῦρον = Nerv; Bili„neurin"); im Hirn, im Eidotter in Form von Lecithin, einer Verbindung des Cholins mit Glycerinphosphorsäure und Fettsäuren enthalten]; findet sich ferner im Hopfen (daher im Bier), in Fliegenpilzen (neben Muskarin $(OH)_2CH.CH_2.N(CH_3)_3OH$[?]); entsteht aus Sinapin („Sinkalin").

Vinyltrimethylammoniumhydroxyd $CH_2:CH.N(CH_3)_3OH$ (Neurin, νεῦρον = Nerv); findet sich in gewissen Fäulnisprodukten der Eiweißstoffe, den (bes. bei der Leichenverwesung entstehenden) „Ptomainen" (πτῶμα = Leichnam).

c) Oxyaniline (vgl. auch den Artikel „Phenole).

Aminophenole $NH_2C_6H_4OH$; o-Aminophenol Fp. 170°; schwer löslich in Wasser; bildet leicht o-Kondensationsprodukte (Anhydrobasen, Benzoxazole; s. die analogen Reaktionen der „Diamine"). — m-Aminophenol Fp. 122°; Ausgangsprodukt für die Rhodaminfarbstoffe. — p-Aminophenol Fp. 184° geht leicht in Chinon bezw. Chinonchlorimid über.

p-Aminophenetol $NH_2C_6H_4OC_2H_5$ (p-Phenetidin) ist die Grundsubstanz des Phenacetins $CH_3CO.NHC_6H_4.OC_2H_5$ und des Pyrantins $(CH_2CO)_2NC_6H_4.OC_2H_5$; beide finden als Antipyretica Verwendung.

[2,4]Diaminophenol $(NH_2)_2[2,4]C_6H_3[1]OH$; sehr zersetzlich; seine Salze finden unter dem Namen Amidol in der Photographie Verwendung als Entwickler.

5. Halogenamine.

Bromäthylamin $Br(CH_2)_2NH_2$ gibt bei der Behandlung mit Ag_2O oder KOH Dimethylenimin (s. oben); ähnliche Ringsschließungen kann man auch an den Halogensubstitutionsprodukten der höheren Halogenalkylamine ausführen.

Halogenaniline

	o		m		p	
Substituent	Fp.	Sdp.	Fp.	Sdp.	Fp.	Sdp.
F	—		—		flüss.	188°
Cl	flüss.	207	flüss.	230°	70°	230°
Br	36°	229°	18°	251°	63°	Zers.
J	56°	—	27°	—	63°	—

p-Chloranilin ist eine stärkere Base als o- bezw. m-Chloranilin.

6. Nitroamine (Nitramine).

a) NO_2 an N gebunden; Dimethylnitramin $(CH_3)_2N.NO_2$. Fp. 58°, Sdp. 187°.

b) NO_2 an C gebunden; von aliphatischen Verbindungen sei das tautomere 1,3-Tetramethyldiamino-2-nitropropan $[(CH_3)_2NCH_2]_2CHNO_2 \rightleftarrows [(CH_3)_2NCH_2]_2C:NO.OH$ erwähnt. — Wichtiger sind die Nitroamine der aromatischen Reihe:

Nitraniline $NO_2CH_4NH_2$; o-Nitranilin Fp. 76°; m-Nitranilin Fp. 114°; p-Nitranilin Fp. 147°; die o- und die p-Verbindung (nicht die m-Verbindung) geben beim Kochen mit Alkali die entsprechenden Nitrophenole.

Dinitraniline $(NO_2)_2C_6H_3NH_2$; 1,24-Dinitranilin Fp. 182°; 1,26-Dinitranilin Fp. 138°.

Trinitranilin $(NO_2)_3C_6H_2NH_2$ (Pikramid) Fp. 186°, orangerote Nadeln; gibt beim Erwärmen mit Alkali Pikrinsäure.

Hexanitrodiphenylamin entsteht beim Nitrieren von Diphenylamin; sein ziegelrotes Ammoniumsalz bildet den Farbstoff Aurantia.

7. Nitrosoamine (Nitrosamine).

Dimethylnitrosamin $(CH_3)_2N.NO$ Sdp. 148°.

p-Nitrosodimethylanilin $(NO)C_6H_4N(CH_3)_2$ Fp. 85°; große grüne Blätter; gibt durch Reduktion das für die Farbstofftechnik wichtige p-Aminodimethylanilin.

8. Säureamide und -imide.

Formamid $HCO.NH_2$; flüssig; mit H_2O, Alkohol und Aether mischbar; löst zahlreiche Stoffe (oft unter Bildung von Verbindungen) auf; z. B. löst sich HgO unter Bildung von Quecksilberformamid $(HCONH)_2Hg$, das zu subkutanen Einspritzungen verwendet wird.

Acetamid CH_3CONH_2, lange Nadeln von eigentümlichem Geruch, löslich in H_2O und in Alkohol; löst ebenfalls HgO auf.

Benzamid $C_6H_5CONH_2$; Fp. 130°, Sdp. 288°; leicht löslich in heißem H_2O, Alkohol und Aether.

Acetanilid $C_6H_5NHCOCH_3$ (Antifebrin), kleine weiße Blättchen, schwer löslich in kaltem Wasser; wird als Antipyreticum und Antirheumaticum verwendet.

Kohlensäuremonamid $CO(OH)NH_2$ und Kohlensäurediamid $CO(NH_2)_2$ (Harnstoff) werden im Kapitel „Kohlensäurederivate" näher besprochen.

Oxaminsäure $OHCO.CONH_2$ Fp. 210°.

Oxamid $NH_2CO.CONH_2$; weißes Pulver, unlöslich in H_2O und Alkohol.

Succinamid $NH_2CO(CH_2)_2CONH_2$; feine weiße Nadeln, löslich in heißem H_2O; zerfällt bei 200° in NH_3 und

Succinimid $\begin{matrix} CH_2CO \\ CH_2CO \end{matrix} \rangle NH$, Fp. 126°, Sdp. 288°; besitzt Säurecharakter.

o-Phtalsäurediamid $C_6H_4\langle \begin{matrix} CONH_2 \\ CONH_2 \end{matrix}$, Fp. 140 bis 160°, geht beim Schmelzen über in

Phtalimid $C_6H_4\langle \begin{matrix} CO \\ CO \end{matrix} \rangle NH$, Fp. 238°, dient zur Herstellung zahlreicher Amine.

9. Aminosäuren und Lactame.

Aminoessigsäure NH_2CH_2COOH (Glycocoll γλυκύς = süß; κόλλα = Leim, Leimsüß, Glycin); Fp. 232 bis 236°; zuerst aus Leim erhalten; hat süßen Geschmack; große rhombische Säulen, löslich in 4 Teilen kalten Wassers; die Lösung gibt mit $FeCl_3$ intensiv rote Färbung (die durch Säuren aufgehoben, durch NH_3 aber wieder erzeugt wird) und löst viele Metalloxyde unter Salzbildung; $(NH_2CH_2COO)_2Cu + H_2O$ bildet dunkelblaue Nadeln; andererseits bildet die Aminoessigsäure mit Salzsäure und Salpetersäure Ammoniumsalze.

Methylglycocoll $NH(CH_3)CH_2COOH$ oder $\begin{matrix} COO \\ CH_2NH_2CH_3 \end{matrix}$ (Sarkosin; σάρξ = Fleisch): Fp.

210 bis 220°, rhombische Säulen, leicht löslich in H_2O, schwer in Alkohol; entsteht als Zersetzungsprodukt des in dem Fleischsaft enthaltenen Kreatins.

Trimethylglycocoll $\begin{matrix} COO \\ CH_2N(CH_3)_3 \end{matrix}$ (Betaïn, Lycin, Oxyneurin s. Neurin unter 4b) zerfließliche Kristalle, findet sich in der Runkelrübe (Beta vulgaris „Betaïn"), daher in der Melasse (liefert bei der Destillation der Schlempe Trimethylamin); ferner in Lycium barbarum („Lycin"), im Baumwollsamen und in Weizen- und Malzkeimen.

Benzoylglycocoll $C_6H_5CO.NHCH_2COOH$ (Hippursäure ἵππος = Pferd, οὖρον = Harn), Fp. 187°; findet sich im Harn der Pflanzenfresser. Toluol, Benzoësäure und Zimmtsäure werden im Organismus in Hippursäure umgewandelt; rhombische Säulen, leicht löslich in heißem Wasser, Alkohol und Aether.

α-Aminopropionsäure $CH_3CH(NH_2)COOH$ oder $CH_3CH\begin{matrix} COO \\ | \\ NH_3 \end{matrix}$; (Alanin; dieser Name hängt mit „Aldehydammoniak" zusammen), Fp. 293°; Büschel von harten Nadeln; löst sich in 5 Teilen Wasser, weniger in Alkohol, unlöslich in Aether. Das Benzoylalanin $CH_3CHNH(C_6H_5CO)COOH$ ist mittels seines Brucinsalzes in die optisch aktiven d- und l-Komponenten zerlegt worden, aus denen durch hydrolytische Spaltung d- und l-Alanin zu erhalten sind.

α-Aminoisovaleriansäure $(CH_3)_2CHCH(NH_2)COOH$ (Butalanin) findet sich in der Bauchspeicheldrüse der Ochsen.

α-Aminoisocapronsäure $(CH_3)_2CHCH_2CH(NH_2)COOH$ (Leucin; λευκός = weiß schimmernd); Fp. 270°; glänzende, fettig sich anfühlende Schuppen oder Blättchen; löst sich in 48 T. Wasser und in 800 T. heißem Alkohol; findet sich vielfach im Tierkörper, z. B. in der Bauchspeicheldrüse, in der Milz, den Lymphdrüsen usw. Bildet sich beim Verwesen von Eiweißsubstanzen. Das natürlich vorkommende Leucin ist optisch aktiv und zwar linksdrehend; das HCl-Salz dreht rechts. Aus synthetischem Leucin lassen sich durch Herstellung der Benzoyl- bezw. Formylverbindung, Verwendung optisch aktiver Basen (Cinchonin) und hydrolytische Spaltung (s. α-Aminopropionsäure) die optisch aktiven Konponenten erhalten; d-Leucin kann auch mittels Penicillium glaucum aus i-Leucin dargestellt werden.

Glycylglycin $NH_2CH_2CO.NHCH_2COOH$, Fp. 215 bis 220°; einfachste Verbindung der Di- resp. Polypeptidreihe, welche Aminacylreste an die Aminogruppen anderer Aminosäure gebunden enthalten; diese Verbindungen sind für Synthese und Abbau der Eiweißstoffe wichtig.

γ-Butyrolactam $\begin{matrix} CH_2CO \\ | \\ CH_2CH_2 \end{matrix}\rangle NH$ (α-Pyrrolidon), Fp. 25°, Sdp. 250°; hat schwach basische und schwach saure Eigenschaften. — Während die Aminosäuren nicht giftig sind, haben die γ- und δ-Lactame strychninartige Wirkungen.

o-Aminobenzoesäure $NH_2C_6H_4COOH$ (Anthranilsäure), Fp. 145°; spaltet sich beim Erhitzen in Anilin und CO_2; die wässerige Lösung schmeckt süß.

Aminobernsteinsäuren $\begin{matrix} NH_2.CHCOOH \\ | \\ CH_2COOH \end{matrix}$ (Asparaginsäuren) sind die Muttersubstanzen der

Asparagine $\begin{matrix} NH_2.CH.COOH \\ | \\ CH_2CONH_2 \end{matrix} + H_2O$; d- und l-Asparagin bilden glänzende rhombische Kristalle, die in heißem Wasser ziemlich leicht, in Alkohol und Aether wenig löslich sind. l-Asparagin schmeckt widerlich fad; es kommt im Spargel (Asparagus officinalis), in der Runkelrübe, in Erbsen- und Bohnenpflanzen, in Getreidekeimen und anderem vor. d-Asparagin schmeckt süß; es findet sich neben viel l-Asparagin in Wickenkeimlingen.

10. Nitrile und Isonitrile s. „Cyanverbindungen".

11. Hydroxylaminderivate.

α-Methylhydroxylamin NH_2OCH_3; bildet ein HCl-Salz vom Fp. 149°; reduziert (im Gegensatz zu NH_2OH) nicht alkalische Cu-Lösungen.

Triäthylaminoxyd $(C_2H_5)_3NO$ ist nicht in freiem Zustand bekannt, aber in Form des Oxydhydrats $(C_2H_5)_3N(OH)_2$ und des Jodids $(C_2H_5)_3N(OH)J$. Der Triylkylaminrest in diesen (und homologen) Verbindungen ist vergleichbar einem Erdalkalimetall in Erdalkalihydroxyden usw.

Acetaldoxim $CH_3CH:NOH$ hat zwei Modifikationen, deren eine bei 12° schmilzt und leicht in die bis 47° schmelzende übergeht.

12. Hydrazinderivate.

Phenylhydrazin $C_6H_5NH—NH_2$, tafelförmige Kristalle; d des unterkühlten Schmelzflusses bei 21° 1,091; als Reagens auf Aldehyde und Ketone, sowie als Ausgangsprodukt für das Antipyrin von großer Bedeutung.

Diphenylhydrazin $C_6H_5NH—NHC_6H_5$ Hydrazobenzol; Fp. 131°; farblose Blätter oder Tafeln, in H_2O unlöslich, leicht löslich in Alkohol und Aether; riecht kampferartig, bildet keine Salze; oxydiert sich an der Luft oder in alkalischer Lösung zu Azobenzol.

Literatur. ***Gmelin, Kraut, Friedheim, Peters,*** *Handbuch der anorganischen Chemie, Heidelberg, Carl Winter, 1905 bis 1911.* — ***Abegg*** *und* ***v. Braun,*** *Handbuch der anorganischen Chemie, Leipzig, S. Hirzel, 1905 bis 1911.* — ***v. Richter, Anschütz, Schroeter,*** *Chemie der Kohlenstoffverbindungen, Bonn, Friedrich Cohen, 1905 bis 1909.* — ***Meyer*** *und* ***Jacobson,*** *Lehrbuch der anorganischen Chemie, Leipzig, Veit & Co., 1902 bis 1911.* — ***F. Henrich,*** *Neuere theoretische Anschauungen auf dem Gebiete der organischen Chemie, Braunschweig, Fr. Vieweg & Sohn, 1908.* — ***Th. Posner,*** *Lehrbuch der synthetischen Methoden, Leipzig, Veit & Co., 1903.* — ***E. Wedekind,*** *Entwickelung der Stereochemie des fünfwertigen Stickstoffs, Stuttgart, Ferd. Enke, 1909.* — ***M. Scholtz,*** *Optisch-aktive Verbindungen des Schwefels, Selens, Zinns, Siliciums und Stickstoffs, Stuttgart, Ferd. Enke, 1906.* — ***J. Schmidt,*** *Ueber die Halogenalkylate und quaternären Ammoniumbasen, Stuttgart, Ferd. Enke, 1899.*

Th. Posner.

Amontons
Guillaume.

Geboren 1663 in Paris; gestorben 1705 ebenda. Er konstruierte 1687 ein Hygrometer, das aus einer Hohlkugel von Hammelfell bestand, die sich bei feuchter Luft ausdehnte, bei trockener zusammenzog. 1699 wurde er zum Mitglied der Pariser Akademie ernannt auf Grund einer Arbeit über meteorologische Instrumente. 1703 veröffentlichte er die Erfindung des offenen Luftthermometers. Er legte endgültig den Siedepunkt des Wassers als Fixpunkt für das Thermometer fest.

E. Drude.

Amorphe Körper

sind entweder homogene Flüssigkeiten mit sehr großer innerer Reibung wie z. B. glasig erstarrter Quarz, Gerstenzucker usw. oder heterogene [disperse (kolloide)] Systeme mit großer Verschiebungselastizität wie z. B. feste Gelatine, gewisse Gläser usw. Vgl. die Artikel „Aggregatzustände“ und „Disperse Systeme“.

Ampère
André Maria.

Geboren am 22. Januar 1775 in Lyon; gestorben am 10. Juni 1836 auf einer Reise in Marseille. Er verlebte seine Kindheit auf dem Lande, wo er seine geistige Nahrung aus dem großen Dictionnaire von d'Alembert und Diderot bezog, dessen 20 Bände er durcharbeitete. Infolge der Guillotinierung seines Vaters 1793 verfiel er in Apathie. Sein Interesse wandte sich zunächst wieder Rousseau und der lateinischen Sprache sowie botanischen Studien zu. Durch Lavoisiers Schriften angeregt widmete er sich dem Studium der Chemie und Physik, wurde Privatdozent in Lyon, 1807 Professor an der Zentralschule in Bourg, bald darauf an der polytechnischen Schule in Paris, 1824 Professor der Physik am Collège de France, 1814 Mitglied der Pariser Akademie. Den Zeitgenossen galt er wegen seiner phantastischen Ideen und seiner Neigung zu Extremen als Sonderling. Seine Arbeiten beschäftigen sich im wesentlichen mit Elektrizität und Magnetismus, doch hat er auch Untersuchungen über die Doppelbrechung des Lichts an Kristallen angestellt. 1821 veröffentlichte er seine Elektrodynamik (Ampèresches Gesetz), 1822 die elektrodynamische Theorie des Magnetismus. Er schrieb ferner Considération sur la théorie mathematique du jeu und Essai sur la philosophie des sciences.

Literatur. ***Barthélemy Saint Hilaire,*** *Philosophie des deux Ampères. Paris 1875. — La vie et les travaux de A. M. Ampère, Lyon 1886. —* ***Arago,*** *Werke II S. 3. —* ***Rosenberger,*** *Geschichte der Physik III S. 201. Braunschweig 1887 bis 1890.*

E. Drude.

Amphibia.

1. Die Klasse Amphibia. 2. Morphologie und Physiologie: a) Körperform. b) Skelett. c) Haut. d) Muskulatur. e) Nervensystem. f) Sinnesorgane. g) Darmkanal. h) Atmungsorgane und Hautatmung. i) Kreislaufsorgane. k) Lymphgefäßsystem. l) Urogenitalsystem. m) Geschlechtsunterschiede. n) Geschlechtsprodukte und Laich. 3. Embryologie. 4. Verwandlung: a) Larven. b) Neotenie. c) Ichthyoden. d) Abgekürzte Entwickelung. e) Brutpflege. 5. Biologie. 6. Systematik und Phylogenie. 7. Geographie.

1. Die Klasse Amphibia. Im Anschluß an Linné hat man längere Zeit Amphibien und Reptilien in einer Klasse vereinigt, bis Merrem (Tentamen systematis Amphibiorum Marburg 1820) und Leuckart (Einiges über fischartige Amphibien. Okens Isis 1821) die Trennung der nackten Amphibien als eigene Klasse Amphibia von den beschuppten Reptilia vorschlugen. Die Richtigkeit dieser Trennung hat sich vollauf bestätigt; die Unterschiede zwischen beiden Klassen erwiesen sich als sehr wesentlich. In einigen wichtigen Punkten (Fehlen eines Amnion und einer Allantois, eines Metanephros; Entwickelung der Jungen im Wasser) schliessen sich die Amphibien sogar den Fischen an. Huxley (Anatomy of Vertebrated Animals 1871) vereinigte deshalb die Amphibien mit den Fischen zu den Ichthyopsida, doch werden dadurch der Charakter der Amphibien als Landwirbeltiere mit Beinen statt Flossen und die engen Beziehungen der ausgestorbenen Amphibien, der Stegocephalen, zu den primitiven Reptilien zu sehr verschleiert. Die lebenden Amphibien bilden eine sowohl den Fischen als auch den Reptilien gegenüber scharf begrenzte Klasse der Wirbeltiere, die vor allem durch folgende Merkmale gekennzeichnet ist: die Amphibien besitzen typische Beine mit Zehen; unpaare Flossen sind höchstens in Form eines Hautsaums entwickelt, immer ohne Skelett; die Haut ist nackt, schleimig, ohne Schuppen oder diese sind in der Haut verborgen; am Hinterhaupt befindet sich ein paariger, nur vom Occipitale laterale gebildeter Gelenkhöcker; oberer und unterer Hinterhauptknochen fehlen; der hinterste, aus dem Schädel austretende Hirnnerv ist der Nervus vagus; das Parasphenoid ist gut entwickelt; die Rippen sind schwach und treten nicht mit einem Sternum in Verbindung; ein Metanephros ist nicht vorhanden; das Herz besitzt eine Kammer und 2 Vorhöfe, ferner einen Conus arteriosus mit 2 oder mehr Reihen von Klappen; die Tiere sind wechselwarm; die Entwickelung geht ohne Amnion und Allantois von statten; die Larven leben im Wasser und haben meistens äußere Kiemen; sie machen eine Metamorphose durch.

Zu den Amphibien gehören die Schwanzlurche (Salamander) oder Urodela, die Frösche oder Anura und die Blindwühlen oder Gymnophiona.

2. **Morphologie und Physiologie.** 2a) Der Körper ist gestreckt bei den Urodelen und Gymnophionen, sehr kurz bei den Fröschen. Einen gut entwickelten Schwanz haben die Urodelen; den Gymnophionen und Anuren fehlt er. Die Gliedmaßen sind kurz und ziemlich schwach bei den Urodelen; Rückbildung derselben kommt hier vor (Siren, Amphiuma, einige grabende Spelerpes-Arten), doch fehlen die vorderen Gliedmaßen bei Urodelen nie vollständig. Dagegen entbehren die wurmförmigen, grabenden Gymnophionen der Gliedmaßen gänzlich. Bei den Anuren sind die hinteren Gliedmaßen, in Anpassung an die hüpfende Fortbewegung, meist verlängert und sehr kräftig entwicket.

2b) Skelett. Die gut entwickelte knöcherne Wirbelsäule wird bei Anuren und Urodelen durch 1, seltener 2 Sakralwirbel in einen Rumpf- und einen Schwanzabschnitt geteilt; obwohl der Körper zwischen dem Kopfe und den vorderen Gliedmaßen oft etwas verengt ist, kommt es doch nicht zur Bildung eines Halsabschnittes. Zur Befestigung des Schädels an der Wirbelsäule ist der vorderste Wirbel modifiziert; sein Körper ist verbreitert und bildet die beiden Gelenkflächen für die Hinterhauptkondylen. Der 2. Wirbel bleibt unverändert. Es geht den Amphibien jene Modifikation der 2 ersten Wirbel zu Atlas und Epistropheus ab, die so typisch ist für die Amnioten; die beiden vorderen Wirbel bilden bei den Amphibien kein Drehgelenk. Der vorderste entspricht überhaupt nicht dem Atlas, sondern einem Wirbel, der bei den Amnioten in den Schädel aufgenommen ist; die Bezeichnung als Atlas sollte daher vermieden werden. Die Zahl der Wirbel wechselt sehr; bei den Urodelen sind meist 15 bis 20 Rumpfwirbel und 25 bis 35 Schwanzwirbel vorhanden, doch steigert sich die Zahl bei Formen mit gestrecktem Körper ganz wesentlich. So hat Proteus 30 Rumpfwirbel (den Sakralwirbel eingeschlossen) und 28 oder mehr Schwanzwirbel, Siren etwa 40 und 35 oder mehr, Amphiuma 63 und 30 bis 35. Bei den Anuren (Fig. 1), wo die Befestigung des Beckens an der Wirbelsäule in Anpassung an die hüpfende Fortbewegung sehr weit vorn liegt, ist die Rumpfwirbelsäule stark verkürzt und besteht typisch aus nur 8 Wirbeln; der 9. ist Sakralwirbel, dann folgt ein einheitlicher Knochen, das Steißbein (Os coccygis oder Urostyl), das vom Aufbau aus Wirbeln nur vorn noch Andeutungen zeigt. Bei Pelobates ist der vordere Teil des Steißbeins noch als 10. Wirbel erkennbar, besitzt einen Querfortsatz und dient als 2. Sakralwirbel neben dem 9. Wirbel der Befestigung des Beckens. Zwei Sakralwirbel sind auch vorhanden bei Pipa und Hymenochirus, wo der 8. und 9., bzw. der 6. und 7. Wirbel die

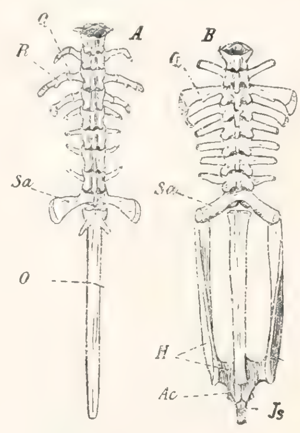


Fig. 1. Wirbelsäule der Anuren. A Discoglossus. Größtenteils nach Wiedersheim. Vgl. Anat. 7. Aufl. 1909 Fig. 48; B Rana mit Becken. Nach Gegenbaur. Vgl. Anat. Bd. 1 1898 Fig. 131. Ac Gelenkfläche für das Femur; H Ileum; Is Ischium; O Os coccygis; Q Querfortsätze; R Rippen; Sa Sakralwirbel; Knorpel punktiert. Verkleinert.

Sakralwirbel sind. Bei Hymenochirus hat wohl eine Verschiebung des Beckens nach vorn stattgefunden, bei Pipa vielleicht nur eine Verwachsung der beiden vordersten Rumpfwirbel, wie sie bei Hymenochirus, Ceratophrys u. a., oft auch bei Xenopus vorkommt; die Sakralwirbel bei Pipa wären dann der 9. und 10. Wirbel, wie bei Pelobates, bei Hymenochirus der 7. und 8.; der ausgestorbene Palaeobatrachus hat 3 Beckenwirbel, den 6. bis 8. Bei den Gymnophionen ist die Zahl der Wirbel sehr hoch; sie kann bis weit über 200 steigen. Ein Sakralwirbel fehlt; dadurch ist die Grenze zwischen Rumpfwirbelsäule und dem sehr reduzierten Schwanzabschnitt nicht genau bestimmbar. Die Wirbel der Amphibien sind verbunden durch knorpelige Zwischenwirbelscheiben, in denen meist ein Gelenkspalt entwickelt ist, und durch die vorderen und hinteren Gelenkfortsätze (Zygapophysen) der oberen Bogen. Die Bildung eines Gelenkspaltes in den Zwischenwirbelscheiben unterbleibt bei den Gymnophionen und einem Teil der Urodelen. Die Zwischenwirbelscheiben sind dann schwach entwickelt; sie verschwinden bei Mazeration und es entstehen dann amphicöle Wirbel. Meist bildet sich ein mehr oder weniger voll-

kommener Gelenkspalt und die besser entwickelte Intervertebralscheibe verkalkt und bleibt bei Mazeration erhalten; je nachdem sich nun ihre Hauptmasse dem nächsthinteren oder dem nächstvorhergehenden Wirbelkörper anschließt, werden die Wirbel opisthocöl (viele Urodelen, einige Anuren) oder procöl (die meisten Anuren). Die Wirbel der Urodelen haben einen sanduhrförmigen kleinen Körper und breiten, flachen oberen Bogen; die vorderen haben keine deutlichen Dornfortsätze. Querfortsätze treten an den Rumpfwirbeln und den vorderen Schwanzwirbeln auf; sie gehen von den oberen Bogen ab und sind gegabelt oder ganz in obere und untere Querfortsätze (Diapophysen oder Parapophysen) gespalten, entsprechend der Gabelung des proximalen Rippenendes. An den Schwanzwirbeln, mit Ausnahme einiger vorderer, treten untere Bogen (Hämalbogen) auf, die in untere Dornfortsätze endigen. Der Sakralwirbel hat kräftige Querfortsätze, die sehr kurze aber kräftige Rippen tragen, an denen das Becken mittels Bindegewebe befestigt ist. In der Ontogenie der Urodelenwirbel ist das Zurücktreten von Knorpel auffallend; es entstehen knorpelige obere und untere Bogen, doch bleiben diese klein und bilden keinen eigentlichen Wirbelkörper, sondern dieser entsteht größtenteils durch direkte Verknöcherung des skeletogenen Gewebes in Form einer perichordalen Knochenhülse. Die Kontinuität der Chorda wird unterbrochen durch die Zwischenwirbelscheiben, wenn diese gut entwickelt sind, und durch selbständige Knorpelbildung in der Chorda in der Mitte der Wirbelkörper; dieser sogenannte Chordaknorpel soll von den Chordazellen gebildet werden, doch wurde dies neuerdings wieder bestritten (G e o r g i Anat. Anz. Bd. 38 1911).

Die Wirbel der Gymnophionen (fast nur Rumpfwirbel) sind lang, mit schlankem sanduhrförmigem Körper und breitem, niedrigem oberen Bogen, ohne Dornfortsätze. Von der Ventralfläche der Wirbelkörper geht nach hinten ein eigentümlicher medianer Fortsatz ab, der sich der Ventralfläche des nächsthinteren Wirbels zwischen dessen nach vorn und unten vorspringenden Parapophysen eng anlegt; die Verbindung der Wirbel gewinnt dadurch sehr an Festigkeit, was diesen unterirdischen Tieren beim Bohren ihrer Gänge nützlich sein muß.

Die Wirbel der Anuren sind kürzer als die der Urodelen, mit kräftigerem, zylindrischem Körper. Die oberen Bogen haben dieselbe flache, breite Form; ein medianer Kiel geht hinten in einen oft deutlichen Dornfortsatz über. Die Querfortsätze sind sehr gut entwickelt, oft auffallend lang und entspringen von den oberen Bogen. Der Sakralwirbel trägt kräftige, runde oder verbreiterte Querfortsätze; sind 2 Sakralwirbel vorhanden, so verwachsen ihre Querfortsätze und bilden zusammen jederseits eine große horizontale dreieckige Knochenplatte (Aglossen, P e l o b a t e s). Das Becken verbindet sich direkt, ohne Vermittelung von Rippen, mit dem Sakralwirbel. Der vorderste Wirbel ist dem der Urodelen ähnlich, doch besitzt er keinen „Zahnfortsatz"; er hat keine Querfortsätze; zeigt er solche (Aglossen u. a.), so ist der 2. Wirbel mit ihm verwachsen (siehe oben) und die Querfortsätze gehören diesem an. Das Steißbein ist ein langer, kräftiger, einheitlicher Knochen; es enthält eine Fortsetzung des Rückenmarkkanales. Selten verschmilzt es mit dem Sakralwirbel (Aglossen, P e l o b a t e s, B o m b i n a t o r). Bei der Bildung der Wirbel tritt etwas reichlicher Knorpel auf als bei den Urodelen, aber es entsteht doch auch hier ein großer Teil des Wirbelkörpers durch direkte Verknöcherung von Bindegewebe. Die Wirbel bilden sich vorwiegend dorsal von der Chorda; sie sind „notozentrisch" (G a d o w). Die Chordareste kommen nun schließlich entweder im Zentrum des Wirbelkörpers zu liegen, und diese sind perichordal (R a n a, B u f o, H y l a), oder die Wirbelkörper bilden sich unter Steigerung des notozentrischen Typus größtenteils dorsal von der Chorda und sind epichordal (G e g e n b a u r); bei den mittleren Rumpfwirbeln liegt dann die Chorda längere Zeit als flaches Band der Unterseite der Wirbelkörper an (Aglossen, P e l o b a t e s, Discoglossiden).

Die R i p p e n sind an den Querfortsätzen befestigt. Bei den Urodelen und Gymnophionen treten sie an allen Rumpfwirbeln, mit Ausnahme des vordersten, bei den Urodelen auch an den vorderen Schwanzwirbeln auf; aber sie bleiben sehr kurz. Ihre proximalen Enden sind mehr oder weniger deutlich gegabelt. Bei den Anuren fehlen Rippen meistens gänzlich. Freie Rippen kommen nur bei Discoglossiden an den Enden der Querfortsätze des 2., 3. und 4. Wirbels vor (Fig. 1). Bei den Aglossen werden sie bei denselben Wirbeln gebildet, verwachsen aber später untrennbar mit deren Querfortsätzen, die dadurch am 3. und 4. Wirbel ganz besonders lang werden.

Die R i p p e n der Amphibien liegen, wie die der Amnioten, im dorsalen Myoseptum der Stammuskulatur und entsprechen den dorsalen Rippen der Fische. Zwar entspringen sie viel mehr dorsal als diese, doch beruht dies auf einer sekundären Verlagerung, die bei Urodelen und Gymnophionen mit der Bildung eines eigentümlichen Rippenträgers zusammengeht, der die

beiden Querfortsätze aus sich hervorgehen läßt (Göppert Festschrift für Gegenbaur 1896).

Daß die Rippen bei den Stammformen der lebenden Amphibien länger waren und die Leibeshöhle umschlossen, ist nicht unwahrscheinlich. Treten doch bei einem Teil der Stegocephalen recht lange Rippen auf. Goette fand bei Bombinator einige paarige spangenartige Knorpelbildungen in der Bauchmuskulatur, die nach Gegenbaur ventralen Abschnitten von wahren Rippen entsprechen könnten. Es ist denn auch möglich, daß die ventromediale Knorpelplatte, die am Schultergürtel auftritt, ein wahres, aus Rippen hervorgegangenes Sternum ist; es stimmt in der Lage, in den Beziehungen zum Schultergürtel und in der paarigen Anlage damit überein. Ontogenetisch ist allerdings kein Zusammenhang mit Rippen nachgewiesen. Das Sternum ist von hinten her den Coracoiden angelagert. Bei den Urodelen ist es eine dünne Knorpelplatte, die einen Fortsatz nach hinten entsenden kann. Bei den Anuren (Fig. 2 St) ist es recht verschieden entwickelt; sein vorderer Teil verknöchert oft. Neben diesem eigentlichen Sternum kommt bei vielen Anuren noch ein Omosternum, früher auch Episternum genannt (Fig. 2 O), vor, das nach vorn vom Schultergürtel vorragt und zum Teil verknöchern kann. Es entsteht paarig und zwar gelegentlich in so engem Zusammenhange mit dem Schultergürtel, daß es ebensogut genetisch zum Schultergürtel gehören kann wie zum Sternum.

Während am Schultergürtel der Stegocephalen Deckknochen, Cleithrum, Clavicula und Interclavicula, einen wesentlichen Anteil haben, fehlen sie den Urodelen, und bei den Anuren ist nur die Clavicula erhalten. Der Schultergürtel der Urodelen besteht jederseits aus einer großen, einheitlichen Knorpelplatte, woran man dorsal ein Schulterblatt, Scapula, ventral ein Coracoid und Procoracoid unterscheiden kann. In der Mediane greifen die Coracoide übereinander, mit ihrem Hinterrande fassen sie in eine Furche des Vorderrandes des Sternums. Scapula, Coracoid und Procoracoid verknöchern zum Teil, bisweilen von drei getrennten Zentren aus; beim erwachsenen ist ein einheitlicher Knochen vorhanden. Bei den Anuren (Fig. 2) sind die Coracoide Knochenspangen; die Procoracoide bleiben knorpelig, können verkalken, und werden von den Claviculae bedeckt und mehr oder weniger vollständig umwachsen. Die medianen Enden der Coracoide und Procoracoide sind verbunden durch die knorpeligen Epicoracoide, die in der Medianlinie entweder übereinander greifen (arciferer Typus Fig. 2 A) oder mit Naht aneinander schließen (firmisterner Typus Fig. 2 B). Das stark gebogene Schulterblatt besteht aus dem knöchernen Scapulare und dem dorsalwärts sich anschließenden Supra-

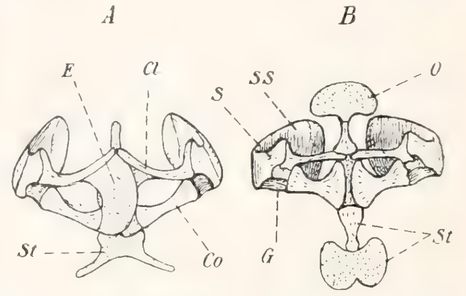


Fig. 2. Schultergürtel der Anuren. A Discoglossus; B Rana. Nach Boulenger Les Batraciens 1910 Fig. 10. Co Coracoid; Cl Clavicula; E Epicoracoid; G Gelenkpfanne für den Humerus; O Omosternum; S Scapulare; Ss Suprascapulare; St Sternum. Knorpel punktiert. Natürliche Größe.

scapulare, das zum Teil verkalken oder auch (z. B. bei Rana) verknöchern kann; Scapulare und Suprascapulare sind durch einen Streifen hyalinen Knorpels beweglich verbunden. Bei einigen Anuren (vielen Engystomatiden) sind Clavicula und Procoracoid rückgebildet oder ganz geschwunden.

Das Becken der Urodelen (Fig. 3) besteht aus einer ventralen unpaaren Knorpelplatte, deren hinterer Bezirk paarig ver-

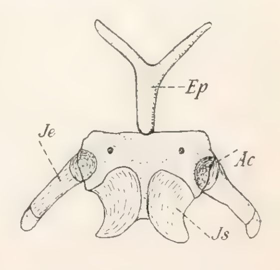


Fig. 3. Becken von Salamandra maculosa von unten. Nach Wiedersheim. Vgl. Anat. Fig. 134. Ac Gelenkpfanne für den Oberschenkelknochen; Ep Epipubis; Je Ileum; Js Ischium. Knorpel punktiert. Vergrößert.

knöchert (Sitzbeine, Ossa ischii), und den gestreckten Darmbeinen (Ossa ilei), die die meist lockere Verbindung mit den Rippen des Sakralwirbels vermitteln; Schambeine (Ossa pubica) fehlen. Nach vorne geht ein medianer Fortsatz ab, das Epipubis, meist ein Y-förmiger Knorpel, der öfters mit der Beckenplatte beweglich verbunden ist. Das Becken der Anura (Fig. 1 B und Fig. 4) zeichnet sich aus durch die außerordentlich verlängerten Darmbeine; der ventrale Abschnitt des Beckens ist stark seitlich zusammengepreßt zu einer vertikalen Platte. Die Pars pubica bleibt knorpelig und verkalkt; ausnahmsweise (z. B. bei Pelobates

und Xenopus) treten darin kleine Verknöcherungen, Schambeine, auf. Ein knorpeliges Epipubis kommt den Aglossen zu. Die Befestigung des Beckens an der Wirbelsäule ist nicht sehr fest, mitunter sogar etwas beweglich.

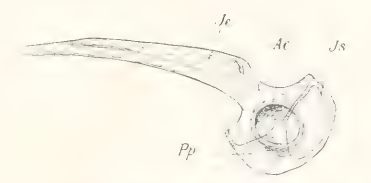


Fig. 4. Becken von Rana von links. Nach Gaupp Anat. d. Frosches Bd. 1 1896 Fig. 48. Ac Gelenkpfanne; Je Ileum; Js Ischium; Pp Pars pubica. Knorpel punktiert. Natürliche Größe.

Das Skelett der freien Gliedmaßen zeigt bei den Urodelen einen primitiven Bau. In Hand- und Fußwurzel

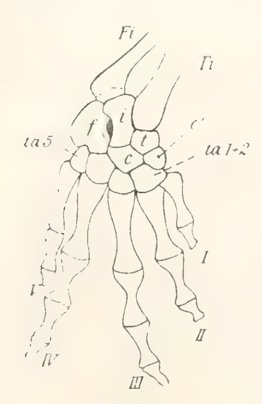


Fig. 5. Rechter Hinterfuß von Salamandra maculosa; c,c' Centralia; f Fibulare; Fi Fibula; i Intermedium; t Tibiale; ta Tarsalia; Ti Tibia. Vergrößert.

ist die Zahl der Elemente ziemlich erheblich; 2, gelegentlich 3 freie Centralia sind vorhanden, wovon das mediale (Fig. 5 c') allerdings oft als 1. Carpale oder Tarsale gedeutet wird. An der Hand sind Intermedium und Ulnare meist verwachsen. Die Verknöcherung von Carpus und Tarsus ist verschieden, am vollkommensten bei landbewohnenden Formen. Die Urodelen haben typisch 4 Finger, den 1. bis 4., mit der Phalangenzahl 2.2.3.2; und 5 Zehen mit 2.2.3.3 (oder 4).2 Phalangen; einige haben keine 5. Zehe (z. B. Salamandrella).

Bei den permanent wasserbewohnenden Formen Proteus, Siren und Amphiuma, mit verlängertem Rumpfe, haben die Extremitäten an Bedeutung verloren und sind erheblich zurückgebildet; das Skelett von Hand und Fuß ist sehr vereinfacht. Bei Amphiuma sind am Ende der stummelförmigen Gliedmaßen nur 3, 2 oder gar 1 Zehe oder Finger vorhanden und die Zahl kann bei demselben Tiere links und rechts verschieden sein. Bisweilen hat man Reste eines 5. Fingers an der Hand gefunden, ebenso solche eines Prähallux und Postminimus (Schmalhausen Anat. Anz. Bd. 37 1910).

Die Vorderextremität der Anuren zeigt eine innige Verwachsung von Radius und Ulna zu einem Os antebrachii. Die Handwurzel verknöchert; bei Discoglossiden besteht sie aus Radiale, Ulnare, 2 Centralia und 5 Carpalia, wovon das 3., 4. und besonders das 5. sehr klein sind; meist sind Carpale 3, 4 und 5 mit dem einen Centrale zu einem Knochen verwachsen. Die 4 Finger haben die Phalangenzahl 2.2.3.3; der rudimentäre Daumen ist dem 1. Finger vollständig angewachsen und besteht aus einem kleinen Metacarpale und höchstens noch einem 2. Knöchelchen. Bei einigen kletternden, mit Haftscheiben versehenen Raniden (z. B. Rhacophorus) und Hyliden wird ein Gelenkknorpel zu einem eigenen Gliede, so daß 3.3.4.4 Phalangen vorhanden zu sein scheinen; bei Hyla ist dieses accessorische Element nur ein Gelenkknorpel.

Die hinteren Gliedmaßen der Anuren sind meist auffallend gestreckt. Sowohl das Femur als auch das von den vollständig verschmolzenen Tibia und Fibula gebildete Os cruris, der Unterschenkelknochen, sind sehr lang. Besonders auffallend ist eine Streckung von Tibiale und Fibulare (Fig. 6), die ein weiteres Segment der Gliedmaßen bilden, indem sie sowohl mit dem Os cruris als auch mit den distalen Tarsalia durch ein gut ausgebildetes Gelenk beweglich verbunden sind. Tibiale und Fibulare sind mit ihren beiden Enden oder auch vollständig (Pelodytes) miteinander verwachsen.

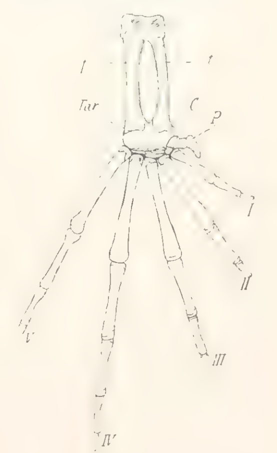


Fig. 6. Rechter Hinterfuß von Rana esculenta. Nach Gaupp Anat. d. Frosches 1896 Bd. 1 Fig. 55; c Centrale; f Fibulare; P Prähallux; t Tibiale; Tar Tarsalia. Natürliche Größe.

Die übrigen Tarsalia sind zu kleinen Scheiben von verkalktem Knorpel reduziert, die sich den inneren Enden der langen Metatarsalia eng anschließen. Die 5 Zehen sind sehr lang, mit der Phalangenzahl 2.2.3.4.3; dazu kommen Reste eines Prähallux. Bei kletternden Formen kommt, wie bei der Hand, gelegentlich eine accessorische Phalange hinzu. Den Gymnophionen fehlt das

Gliedmaßenskelett, auch Becken und Schultergürtel, vollständig.

Das Kopfskelett der Amphibien zeichnet sich durch einige primitive Züge aus. Vor allem ist es wichtig, daß der hintere Abschluß des Schädels gegen den Rumpf um 3 Körpersegmente weiter nach vorn liegt als bei den Amnioten, d. h. die hintere Partie des Schädels der Amnioten wird bei den Amphibien durch die 3 vordersten freien Wirbel vertreten. Der hinter dem Nervus vagus liegende Occipitalbogen (Neocranium) steht bei den Amphibien auf primitiverer Stufe als bei den Amnioten (und den meisten Fischen); er ist protometamer (M. Fürbringer). Es liegt also auch das Hinterhauptgelenk bei den Amphibien weiter vorn als bei den Amnioten, und eine Homologie der Hinterhauptgelenke besteht nicht. Es ist ein paariger, von den seitlichen Hinterhauptknochen gebildeter Condylus (Fig. 7 B *Co*) für die Verbindung mit dem 1. Wirbel vorhanden; hierin liegt eine Aehnlichkeit mit den Säugetieren vor, die aber schon wegen der Nicht-Homologie der Gelenke als rein äußerlich gedeutet werden muß. Wesentlich ist ferner, daß ein Septum

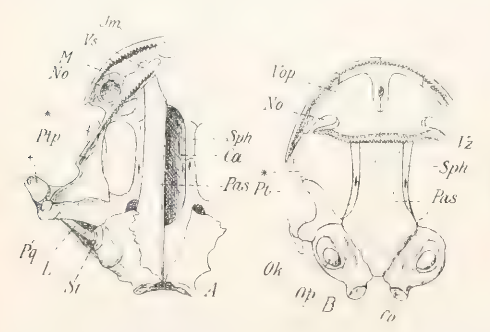


Fig. 7. Schädel von Ambystoma. A einer alten Larve (Axolotl); B eines erwachsenen Tieres. Bei A ist die Hälfte des Parasphenoids entfernt, so daß man durch die große Lücke im Boden des Primordialcraniums in das Cavum cranii sieht. Nach Wiedersheim Morphol. Jahrb. Bd. 3 1877 Tab. 21 Fig. 31 und Tab. 23 Fig. 77. Ca Cavum cranii; Co Condyli; Im Intermaxillare; L Ligament vom Stapes zum Palatoquadratum; M Maxillare; No innere Nasenöffnung; Ok Ohrkapsel; Op Operculum; Pas Parasphenoid; Pq Palatoquadratum; Pt Pterygoid; Ptp Pterygopalatinum; Sph Sphenethmoidale; St Stapes; Vo Vomer; Vop Vomeropalatinum; Vz Vomeropalatinzähne; * Palatinfortsatz des Palatoquadratum; † Gelenkfläche für den Unterkiefer. Knorpel punktiert. Vergrößert.

interorbitale fehlt; die Hirnkapsel dehnt sich in derselben Breite und mit gleichhoch bleibendem Boden nach vorn bis an die Nasenkapseln aus (Fig. 7 A *Ca*); der Amphibienschädel ist plattbasisch (Gaupp). Damit steht in Zusammenhang die gute Entwickelung des Parasphenoids. Ohr- und Nasenkapseln springen weit lateralwärts vor, und auch die seitlich von den Ohrkapseln liegenden Palatoquadrata tragen dazu bei, dem Schädel eine breite, flache Gestalt zu verleihen; dabei kommen der Palatinfortsatz des Palatoquadratum (Fig. 7 B *) und das ihm anliegende Pterygoid seitlich vom Hirnschädel zu liegen, ein charakteristisches Merkmal des Schädels vieler Amphibien. Nur die Gymnophionen haben immer einen schmalen, ziemlich hohen Schädel. Die Pars quadrata des Palatoquadratum ist ein ziemlich großes Knorpelstück, das in der Regel ventral, wo es die Gelenkfläche für den Unterkiefer bildet, verknöchert; sie verschmilzt mit ihrem oberen Ende (Processus oticus) meist (nicht bei den Gymnophionen) mit der Ohrkapsel; ein ventraler Fortsatz (Processus basalis) legt sich der Ventralfläche der Ohrkapsel an, und hier kommt es entweder zu einer Verschmelzung des Knorpels, oder die Verbindung ist gelenkig (Basipterygoidgelenk: viele Anuren, einige Urodelen, z. B. Salamandrella, Ellipsoglossa, Plethodon). Gymnophionen haben entweder ein Gelenk (z. B. Siphonops, Hypogeophis) oder eine Bandverbindung. Eine 3. Verbindung wird durch den Processus ascendens dargestellt, der nach vorn von der Ohrkapsel zur Seitenwandung des Hirnschädels geht. Bei Gymnophionen ist er gut entwickelt, aber bei erwachsenen durch eine Knochenlamelle mit der Pars quadrata zu einer Knochenplatte vereinigt; er reicht hier bis zu den Parietalia hinauf. Der Fortsatz besteht auch bei den Larven der Urodelen und Anuren, doch verschwindet er hier bei der Metamorphose vollständig; erhalten ist er nur bei den Perennibranchiaten, wo er knorpelig und kurz bleibt. Nach vorn geht von der Pars quadrata der schlanke Palatinfortsatz oder Processus pterygoideus ab, der bei den Anuren vorn mit den Nasenkapseln verschmilzt; dies kommt unter den Urodelen nur bei Batrachyperus vor, sonst ist der Fortsatz hier und bei den Gymnophionen mehr oder weniger rückgebildet (Fig. 7 *). Das Palatoquadratum ist, neben der Verbindung durch Deckknochen, besonders durch seinen Processus oticus, meist auch durch den Processus basalis mit dem Schädel fest verbunden; daß diese Verbindung oft gelenkig (Basipterygoidgelenk) ist, und dies wohl ursprünglich immer war, weist auf Bewegungen im Schädel bei den Stammformen hin, die jetzt aber fehlen oder unerheblich sind. Daher bezeichnet man den Amphibienschädel als monimostyl oder wegen der manchmal vorhandenen geringen Beweglichkeit besser als semistreptostyl (Gaupp). Vgl.

weiter unten das beim Schädel der Gymnophionen Gesagte. Am Primordialcranium sind Dach und Boden sehr unvollständig entwickelt. Vollständiger sind die Seitenwandungen, besonders bei Anuren und Urodelen, während diese bei Gymnophionen aus einigen dünnen Knorpelspangen bestehen, wie bei verschiedenen Reptilien. Die Lücken im Dach und im Boden der Hirnkapsel werden von den Deckknochen des Schädeldaches und vom Parasphenoid geschlossen (Fig. 7 A).

Bei der Verknöcherung des Primordialcraniums ist zunächst, entsprechend dem protometameren Charakter des Neocraniums, die geringe Ausbildung der Hinterhauptknochen (Occipitalia) zu erwähnen. Supraoccipitale und Basioccipitale fehlen. Es sind nur seitliche Hinterhauptknochen vorhanden, die sich aber weit in die Ohrkapsel hinein ausdehnen und darin dem Opisthoticum der Reptilien entsprechen; dieser Teil bildet bei Necturus einen selbständigen Knochen, und es liegt daher die Vermutung nahe, daß der Hinterhauptknochen der Amphibien auch das Opisthoticum enthält; daher ist die Bezeichnung Otooccipitale (Gaupp) richtiger als das üblichere Occipitale laterale. Das Fehlen eines Supraoccipitale ist typisch für alle Amphibien; die paarigen Supraoccipitalia der Stegocephalen sind Deckknochen, aus denen das Supraoccipitale der Amnioten wohl nicht entstanden ist (Gegenbaur). Weitere Verknöcherungen des Primordialcraniums sind die Prootica und vorn ein meist paarig angelegtes Sphenethmoidale (Ethmoidale, Gürtelbein der Anuren; hierher wohl auch das sogenannte Orbitosphenoid der Urodelen). Dazu ein Quadratbein als meist kleine Verknöcherung des Palatoquadratum (bei Anuren vom Squamosum ausgehend), und bei Gymnophionen eine Verknöcherung des Processus ascendens, die später mit dem Quadratum durch eine Knochenlamelle zu einem Knochen vereinigt wird. An der Oberseite des Kopfes bilden bei den Gymnophionen Deckknochen ein meist nahezu geschlossenes Dach (Fig. 8). Bei den Anuren ist die Temporalgrube offen; nur ein unterer Jochbogen ist vorhanden; dieser fehlt auch noch den Urodelen, wo aber bisweilen (einige Molge-Arten) eine Art oberer Jochbogen vorhanden ist. Die Deckknochen der Schädeloberseite sind: Parietalia, Frontalia (bei den Anuren zu Frontoparietalia verwachsen), Nasalia, Präfrontalia (gelegentlich 2 oder 3 jederseits), Septomaxillaria, Squamosa (Paraquadrata; Tympanica), Quadratojugalia (Quadratomaxillaria), Prämaxillaria und Maxillaria. Am Dach der Mundhöhle liegen das Parasphenoid und die Vomeres, die bei Aglossen unpaar sind oder fehlen. Palatine und Pterygoide bilden den Palatinbogen; doch ist dieser bei Urodelen (Fig. 7) nur bei den Larven vorhanden (die Knochen sind dabei zu einheitlichen Pterygopalatinen verschmolzen), bei erwachsenen Tieren unvollständig und die Palatina sind dann in die Vomeres aufgenommen (daher Vomeropalatine).

Der Schädel der perennibranchiaten Urodelen hat den Bau des Larvenschädels: der Palatinbogen ist vollständig, mit einheitlichem Pterygopalatinum (nicht bei Siren), ein Maxillare fehlt und das Palatoquadratum ist nach vorn gerichtet, wodurch das Unterkiefergelenk weit nach vorn von der Ohrkapsel kommt und der Schädel schmäler ist.

Der Unterkiefer enthält einen gut entwickelten Meckelschen Knorpel, mit knöchernem Articulare, das den Anuren fehlt; ganz vorn tritt auch eine kleine Verknöcherung auf, das Mentomandibulare, die aber bei Urodelen, Aglossen und Discoglossiden vom Dentale ausgeht. Deckknochen sind ein Dentale, ein Angulare und, bei einigen Gymnophionen und perennibranchiaten Urodelen, wie bei den Larven, ein Spleniale. Bei den Urodelen besteht ein sehr enger Zusammenhang zwischen den Bases der sehr früh auftretenden Zähnchen und mehreren Knochen der Mundhöhle, die ganz oder zum Teil aus den verschmelzenden Bases der Zähnchen entstehen. Solche Zahnknochen sind die Vomeres, Palatina, Splenialia und Teile des Maxillare, Prämaxillare und Dentale. Bei den Anuren entstehen die Knochen viel früher als die Zähnchen.

Der Schädel der Gymnophionen (Fig. 8) zeichnet sich aus durch den Besitz einiger primitiver Merkmale und durch Anpassungen an die grabende Lebensweise (Peter Morph. Jahrb. Bd. 25 1898). Diese bedingt einen sehr festen Bau und starke Verknöcherung; die ganze hintere

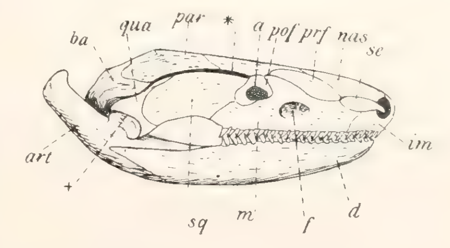


Fig. 8. Schädel einer Gymnophione, Ichthyophis glutinosus. Nach Sarasin Ergebn. naturwiss. Forschungen auf Ceylon Bd. 2 Teil 4 1890 Tab. 15 Fig. 3. a Augenhöhle; art Articulare; ba Basalknochen; d Dentale; im Intermaxillare; m Maxillare; nas Nasale; par Parietale; pof postfrontale; prf präfrontale; qua Quadratum; se Septomaxillare; sq Squamosum; t Tentakelgrube; * Einschnitt im Schädeldache zwischen Squamosum und Frontale und Parietale; † Unterkiefergelenk; 4½ : 1.

Hälfte des Primordialcraniums bildet einen einheitlichen Knochen, den Basalknochen, worin auch das Parasphenoid aufgenommen wird. Das meist vollständige Schädeldach erinnert an das der Stegocephalen; doch ist es nicht ausgeschlossen, daß eine erneute Ausbreitung der Deckknochen, in Anpassung vielleicht an die bohrende Lebensweise, stattgefunden hat. Einige haben noch ein Postfrontale. Als primitiv zu deuten sind der Processus ascendens, das gelegentliche Auftreten eines Spleniale und wohl auch die große Beweglichkeit des Palatoquadratum und des damit verbundenen Squamosum gegen die Hirnkapsel, die im Fehlen eines Processus oticus des Palatoquadratum, im Basipterygoidgelenk, in der mehr lockeren Verbindung des Processus ascendens mit dem Parietale und in der gelenkigen Verbindung des Quadratbeins mit dem mächtigen Stapes begründet ist, wozu noch, jedenfalls bei einigen Arten (Siphonops, Ichthyophis) ein tiefer Einschnitt des Schädeldaches (Fig. 8 *) kommt, der das Squamosum von Parietale und Ohrkapsel trennt. Umfang und Bedeutung der Bewegungen im Schädel sind unbekannt.

Die Unterschiede, die zwischen dem Schädel der Urodelen und ihrer Larven bestehen, wurden schon erwähnt. Viel erheblicher sind die Unterschiede bei den Anuren, deren Larven einen Saugmund mit Hornzähnchen entwickeln, der von einem ziemlich komplizierten Knorpelskelette gestützt wird; die Kiefer der Larven sind kurz, liegen quer; das große Palatoquadratum reicht mit seiner Gelenkfläche für den Unterkiefer sehr weit nach vorn. Ein Hyomandibulare fehlt den Amphibien (ist in den Gehörknöchelchen enthalten). Das Hyobranchialskelett ist als Kiemenbogenskelett bei den Larven ganz anders entwickelt als bei den erwachsenen Amphibien, wo es als Zungenskelett funktioniert und den Kehlkopf stützt (Fig. 9). Die Larven der Amphibien haben einen Hyoidbogen und 4 Kiemenbogen; der Hyoidbogen ist am

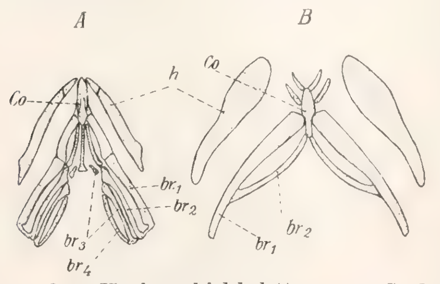


Fig. 9. Hyobranchialskelett von Salamandra; A Larve; B erwachsenes Tier. Nach Drüner Anat. Anz. Bd. 23 1903 Fig. 12 vereinfacht. br Kiemenbogen; Co Copula; h Hyoidbogen. Vergrößert.

Palatoquadratum befestigt; das Skelett ist knorpelig. Bei den erwachsenen Urodelen sind der Hyoidbogen und 2 Kiemenbogen vorhanden, der letzte schwach entwickelt; das Skelett verknöchert zum Teil. Es kommt nicht zur Bildung eines typischen Zungenbeinkörpers; in Zusammenhang mit der Beweglichkeit der Zunge treten verschiedene Komplikationen auf. Die Perennibranchiaten schließen sich den Larven an, aber es kommt zu Verknöcherungen. Bei den erwachsenen Anuren wird der Zungenbeinkörper von einer großen, medianen Knorpelplatte gebildet. Vorn geht davon der schlanke Hyoidbogen ab, der sich an der Ohrkapsel befestigt. Von weiteren Fortsätzen sind nur die hinteren, Processus thyreoidei, die den Kehlkopf stützen, immer gut entwickelt, verknöchern sogar; sie entstehen neu, nicht direkt aus dem Kiemenskelette der Larve, und ihre Homologie mit dem 2. Kiemenbogen der Larven bleibt daher fraglich. Pipa hat keinen Hyoidbogen. Das Hyobranchialskelett der Gymnophionen besteht aus 4 knorpeligen Bogen, dem Hyoidbogen und 3 Kiemenbogen, die sich ventral kontinuierlich von der einen Körperseite auf die andere fortsetzen. Hyoidbogen und 1. Kiemenbogen sind durch ein medianes Stück ohne Spur einer Gliederung miteinander verbunden. Gelegentlich (Coecilia, Ichthyophis) sind Reste eines 4. Kiemenbogens vorhanden. Die geringe Differenzierung des Hyobranchialskelettes der Gymnophionen und seine geringe Umbildung bei der Metamorphose dürfte in Beziehung zu bringen sein zu der schwachen Beweglichkeit der Zunge.

Reste eines weiteren Kiemenbogens, eines 5. oder 6. Bogens, bilden bei den Amphibien das Skelett des Kehlkopfes.

2c) Die Haut der Amphibien besteht aus einer mehrschichtigen, oberflächlich verhornten Oberhaut (Epidermis) und einer meist nicht mächtigen Lederhaut (Corium). Die verhornten Schichten werden periodisch erneuert, besonders oft bei jungen Tieren; die erste Häutung findet gegen Ende der Metamorphose statt. Die alte Hornhaut wird in großen Fetzen (Anuren) oder als ganzes (Urodelen) abgestoßen.

Während einzellige Drüsen in der Epidermis der Erwachsenen fehlen, treten massenhaft große mehrzellige alveoläre Drüsen auf, die meist direkt unter der Epidermis in der Lederhaut liegen. Man kann Giftdrüsen und Schleimdrüsen unterscheiden. Diese halten die Haut schlüpfrig und schützen sie gegen Eintrocknen; ihr Sekret ist auch giftig. Die Giftdrüsen wirken als Schutzmittel und sind beinahe immer nur auf dem Rücken vorhanden; ihr Sekret greift die menschliche Haut nicht an, kann aber heftige Entzündungen der Augen hervorrufen. Die Giftdrüsen treten an verschiedenen Stellen zu größeren Komplexen zusammen; so rufen sie die Seitenwülste auf dem Rücken der Frösche hervor, liegen als Parotisdrüsen

am Nacken usw. In den Daumenschwielen der männlichen Frösche liegen gehäufte Schleimdrüsen. Die Hornschicht der Epidermis kann an verschiedenen Stellen so stark wuchern, daß harte Höcker oder gar Hornstacheln gebildet werden, z. B. auf den Grabschwielen einiger Frösche und auf den Gelenkballen der Zehen. Krallenähnliche Verhornungen der Zehenspitzen kommen vor bei Xenopus, Hymenochirus (Anuren) und Onychodactylus (Urodele). Hierher gehören auch die Hautkämme männlicher Amphibien (vgl. unter m Geschlechtsunterschiede). Die Haut der Amphibien, besonders der Anuren, ist an dem Körper nur locker befestigt, eine Folge der geringen Ausbildung des Unterhautbindegewebes. Dieses ist bei den Anuren beinahe gänzlich durch große Lymphräume verdrängt, die die Haut bis auf bestimmte Septen vom Körper abheben.

Die Farbe der Amphibien wird von in der Haut enthaltenen Pigmenten und farbenerzeugenden Stoffen (Melanine und Lipochrome) bedingt, die in besonderen Zellen der Lederhaut liegen; von viel gringerer Bedeutung sind die Pigmentablagerungen in den Epidermiszellen. Sehr oft ist auch Guanin (weißes Pigment) in Zellen der Lederhaut abgelagert und erzeugt Interferenzfarben. Die Anuren und in viel geringerem Maße die Urodelen können ihre Farbe durch Kontraktionen und Verschiebungen der Pigmentzellen ändern.

Die Anuren und Urodelen sind nie beschuppt; die meisten Gymnophionen besitzen zarte, bis einige Millimeter messende Schuppen, die ganz in der Lederhaut versteckt bleiben; sie wechseln mit Ringen von großen Hautdrüsen ab (Fig. 10). Jede Schuppe besteht aus einer fibrösen Platte, der an der Oberseite kleine verkalkte Plättchen, Squamulae, dicht nebeneinander aufgelagert sind. Die Ausscheidung der Schuppen scheint von epithelartig angeordneten Bindegewebszellen auszugehen.

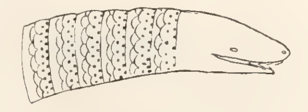


Fig. 10. Lage der Schuppen und der großen Giftdrüsen (schwarze Punkte) bei Ichthyophis glutinosus, wie sie durch die durchscheinende Epidermis sichtbar sind. Nach Phisalix Bull. Musée d'Hist. natur. Paris 1910 Tab. 5 Fig. 1. Verkleinert.

Während diese Schuppen Reste eines primitiven Hautskelettes sind, kommt es gelegentlich bei Anuren zur Bildung neuer Hautverknöcherungen. Nicht sehr selten (Bufo-Arten, Calyptocephalus, einige Hylidae, Ceratophrys, Pelobates cultripes) verknöchert die Kopfhaut in Zusammenhang mit der Schädeldecke, die dadurch sogar stegocephalenähnlich geschlossen sein kann. Bei Ceratophrys-Arten und Lepidobatrachus wird ein Rückenschild gebildet, das bei Brachycephalus mit den Rumpfwirbeln verwächst.

Die Epidermis der Amphibienlarven ist zuerst sehr zart, mit einzelligen Drüsen und bewimpert; später wird sie mehrschichtig, die obere Zellenschicht (Deckschicht) bildet unter Verlust der Cilien einen Cuticularsaum. Die Bewimperung erhält sich besonders lang am Schwanz und anderen Stellen bei Anurenlarven. Mehrzellige Drüsen entstehen erst mit der Metamorphose; sie fehlen den Perennibranchiaten, deren Haut den larvalen Bau beibehält.

2d) Die Muskulatur zeigt bei den Urodelen recht primitive einfache Verhältnisse. Besonders bleibt die Gliederung der Stammesmuskulatur des Körpers in Segmente durch die Zwischensehnen, Myocommata, vielfach erhalten. Die Bauchmuskulatur der Larven besteht nur aus 2 Schichten, der primären Muskulatur, die dann kurz vor und bei der Metamorphose neue Schichten, die sekundäre Muskulatur, abspalten, wobei die primäre mehr oder weniger rückgebildet wird. So entstehen 3 bis 4 Schichten, die gerade und schräge Bauchmuskeln bilden (Maurer Morphol. Jahrb. Bd. 18 1892 und Jenaische Ztschr. Bd. 47 1911). Die Muskulatur der Gliedmaßen zeigt insoweit primitive Verhältnisse, als die Unterschiede zwischen vorderen und hinteren Extremitäten noch nicht so groß sind, wie bei Amnioten. Die bei Fischen mächtige dorsale Trigeminusmuskulatur ist in Resten (Levator bulbi) vorhanden. Das Oeffnen des Maules besorgt ein nach hinten vom Quadratbein liegender Depressor mandibulae (Cephalo-dorso-mandibularis). Die Muskulatur des Hyobranchialskelettes ist bei den Urodelenlarven noch ziemlich gut entwickelt. Bei der Metamorphose wird mit dem Kiemenbogenskelett auch die Muskulatur sehr stark um- und rückgebildet; einige Muskeln bleiben erhalten, darunter solche, die, unter Verlust ihrer Beziehungen zu den Kiemenbogen, für die Bewegungen des Kehlkopfes Bedeutung gewinnen, wie die Levatores arcuum.

Die Muskulatur der Anuren ist in der Hauptsache nur eine Modifikation des bei den Urodelen gegebenen Grundplanes. Nach dem Verlust des Schwanzes fehlt eine typische Schwanzmuskulatur; den Larven dagegen kommt sie zu. Sie wird aber vertreten durch kräftige Muskeln, die vom Steißbein zum Sakralwirbel und zum Ileum ziehen. Die Rumpfmuskulatur behält ihren segmentalen Aufbau, aber die Zahl der Segmente ist sehr gering geworden, entsprechend der Verkürzung des Rumpfes. In der sehr kräftigen

Muskulatur der Gliedmaßen der Anuren ist die starke Entwickelung der kurzen Muskeln an Hand und Fuß besonders auffallend. Dabei ist mit der Bildung eines neuen Segmentes aus den beiden proximalen Tarsalknochen das Auftreten eines besonderen Muskelapparates verbunden. Die bei den Larven vorhandene Muskulatur des Kiemenskelettes geht auch bei den Anuren mit der Metamorphose nicht ganz verloren; sie ist durch die Petrohyoidei vertreten, lange, dünne Muskeln, die von der Ohrkapsel zum Zungenbein und zum Kehlkopf ziehen und wichtige Schluck- und Atmungsmuskeln sind.

Bei den Gymnophionen ist mit den Gliedmaßen auch die zugehörige Muskulatur bis auf ganz geringe Reste verschwunden. Einen wichtigen primitiven Zustand bildet das Auftreten eines kräftigen, in der Tiefe der Temporalgrube gelegenen, vom Schädel zum Pterygoid ziehenden Hebers des Pterygoids, vielleicht eines Protractor pterygoidei, eines ansehnlichen Restes der dorsalen Trigeminusmuskulatur der Fische.

2e) Das Nervensystem. Das Gehirn (Fig. 11) zeigt ein ziemlich gut entwickeltes Vorderhirn, dessen Hemisphären getrennt

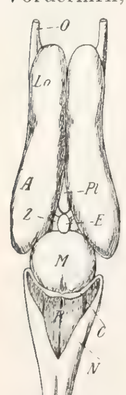


Fig. 11. Gehirn von Molge cristata von oben. Nach Burckhardt Zeitschr. wiss. Zool. Bd. 52 1891 Tab. 21 Fig. 5. A Vorderhirn; C Cerebellum; E Epiphyse; Lo Lobus olfactorius; M Mittelhirn; N Nachhirn; O Olfactorius; Pl Adergeflechtknoten; Z Zwischenhirn. Die Decke des Nachhirns ist entfernt, so daß man in die Rautengrube R sieht. Vergrößerung × 5.

bleiben oder, bei Anuren, vorn, wo sie die Riechlappen bilden, verwachsen. Die Hemisphären bedecken das Zwischenhirn von oben nicht oder doch nur ganz wenig. Bei den Gymnophionen treten kleine Lobi temporales auf. Das Zwischenhirn ist sehr einfach gebaut, mit gut entwickelten Seitenteilen (Thalami). Von seinen Anhangsgebilden ist das riesige, vorn vom Dach ausgehende Adergeflecht zu erwähnen, das auch nach außen als Adergeflechtknoten (Paraphyse) weit vorragt. Ein augenartig ausgebildetes Parietalorgan fehlt; wohl aber ist bei Anuren ein Stirnorgan vorhanden, dessen Endabschnitt abgeschnürt wird und oft als solider Zellenhaufen in der Lederhaut erhalten bleibt (Epiphyse?). Bei Gymnophionen und besonders bei Urodelen ist dieses Stirnorgan schwächer entwickelt. Normal entwickelt, mit engem Binnenraum (Aquaeductus sylvii), ist das Mittelhirn bei Urodelen und Gymnophionen. Bei Anuren erreicht sein dorsaler Teil eine sehr große Ausdehnung, bildet als Lobi optici den breitesten Teil des ganzen Gehirns und enthält einen ziemlich geräumigen, kompliziert gebauten Hohlraum. Das Kleinhirn ist bei allen Amphibien sehr schwach entwickelt als eine vertikal stehende Platte. Die dünne, als Adergeflecht entwickelte Decke der Rautengrube bleibt größtenteils unbedeckt; nur bei Gymnophionen ist sie unter das Mittelhirn und Kleinhirn geschoben. Das verlängerte Mark (Nachhirn) ist bei Anuren und Gymnophionen stark verkürzt. Das Rückenmark erstreckt sich bei Urodelen und Gymnophionen bis zum hinteren Körperende. Bei Anuren ist seine weitgehende Verkürzung bemerkenswert; es verjüngt sich hier noch im Rumpfe (bei Rana im 7. Wirbel) zum Filum terminale, das als Rest des bei Anurenlarven in dem Schwanz liegendem Teiles des Rückenmarkes weit ins Steißbein hineinreicht. Schädelhöhle und Wirbelkanal werden vom Gehirn und Rückenmark nicht ausgefüllt; hier liegen von den Hirnhüllen umschlossene Lymphräume und der, bei Anuren besonders stark entwickelte, Saccus endolymphaticus. Die Hüllen und Lymphräume zeigen wesentlich dieselben Verhältnisse wie bei Fischen. Gehirn und Rückenmark werden umgeben von einer zarten, gefäßreichen Bindegewebshülle, die der Pia mater und Arachnoidea, nach Sterzi (Anat. Anz. Bd. 16 1899) auch noch der Dura der Säuger entspricht.

Von den Gehirnnerven ist hervorzuheben das Fehlen eines Nervus accessorius, der noch nicht vom Vagus getrennt ist, und eines Nervus hypoglossus; die diesem entsprechenden Nerven sind noch vordere Spinalnerven. Ein Nervus terminalis ist unbekannt.

Da das Gehirn sich bis zum Geruchsorgan ausdehnt, ist der Riechnerv sehr kurz; bei den Gymnophionen ist er vollständig in einen dorsalen und einen ventralen Ast getrennt. Der Nervus facialis tritt in unmittelbarer Nähe des Nervus trigeminus aus dem Schädel, und es besteht, wie bei Fischen, eine Verbindung beider Nerven, entweder durch eine Commissur oder durch Aneinanderlagerung ihrer Ganglien (Ganglion geniculi und Ganglion gasseri); bei den Anuren entspringen beide Nerven sogar einem gemeinsamen Ganglion (Ganglion prooticum commune), woraus auch der Nervus abducens hervorgeht. Bei den Larven der Amphibien, bei den Perennibranchiaten, bei Cryptobranchus (die typischen Urodelen müssen näher untersucht werden) und bei Xenopus treten mit einem Seitenliniensystem auch die

dazu gehörigen Nerven, der Ophthalmicus superficialis (des Facialis) und der Ramus lateralis des Vagus auf; dieser ist, entsprechend der Ausbildung von 2 bis 3 Seitenlinien, in einige Längsäste gespalten. Der Glossopharyngeus hat sich, ausgenommen bei Siren, ganz dem Vagus angeschlossen. Ein Nerv, der den spino-occipitalen Nerven der Fische entspricht, ist bei einigen Urodelen beschrieben (Drüner Zoolog. Jahrb. Bd. 15 Anat. 1902 S. 466); den erwachsenen Gymnophionen scheint ein solcher Nerv konstant zuzukommen (Marcus Festschrift für R. Hertwig Bd. 2 1910).

2f) Die Sinnesorgane. Von solchen ist das Auftreten eines Seitenliniensystems sowohl am Kopfe wie am Rumpfe bei den Larven und Perennibranchiaten, aber auch bei typischen erwachsenen Amphibien, so bei einigen Urodelen und bei Xenopus, zu erwähnen. Die Organe stimmen im allgemeinen mit denen der Fische überein, aber es wird kein einheitlicher Kanal gebildet, in dessen Tiefe die Sinnesorgane liegen, sondern diese liegen in Gruppen an der Oberfläche oder in der Tiefe kurzer strichförmiger Einsenkungen der Haut. Auch treten neben der Hauptseitenlinie noch 1 oder 2 andere an der Seite des Rumpfes auf. Mit dem Landleben nach der Metamorphose tritt Rückbildung ein, wobei die Organe in die Tiefe sinken; bei Urodelen, die in der Paarungszeit zum Wasserleben zurückkehren, findet dann eine Erneuerung der Sinneshügel statt. An der Zunge, meist auf Papillen, am Boden und am Dach der Mundhöhle sind Endknospen verbreitet, die als Geschmacks- oder als Tastorgane zu deuten sind. Die Nasenhöhle steht immer durch eine weit vorn, zwischen Vomer, Palatinum und Maxillare liegende innere Nasenöffnung mit der Mundhöhle in Verbindung. In Anpassung an das Wasserleben und an den Atemmechanismus können die äußeren Nasenöffnungen durch Klappen und Muskeln geschlossen und geöffnet werden. Ein Jacobsonsches Organ ist als einfacher, meist lateraler Blindsack vorhanden; nur bei Gymnophionen ist es schärfer abgesetzt, bei Perennibranchiaten ist es rudimentär oder fehlt ganz. Am Auge fehlt ein Processus falciformis (Chorioidealdrüse). Die Akkommodation für Naheinstellung findet durch Kontraktion eines oder zweier Ciliarmuskeln statt; dabei wird die Linse verschoben und ihre Entfernung von der Netzhaut etwas vergrößert. Die Urodelen haben ein oberes und ein unteres Augenlid. die den Larven und Perennibranchiaten fehlen. Das untere differenziert sich bei den Anuren zu der sogenannte Nickhaut. Bei den Gymnophionen fehlen Augenlider und die sehr rudimentären Augen liegen unter der Haut; sie können sogar vom Oberkieferknochen teilweise bedeckt werden. Tränendrüsen sind bei den Amphibien vorhanden; eine größere, als Hardersche Drüse bezeichnet, kommt den Anuren zu. Ein Tränennasengang fehlt nur den Perennibranchiaten. Besonders groß ist die Hardersche Drüse, trotz des sonst rudimentären Auges, bei den Gymnophionen; dies findet seine Erklärung in der Ausbildung eines eigentümlichen, zwischen Auge und Nase liegenden, in eine Tasche zurückziehbaren Tentakels. In die Tasche ergießt sich das Sekret der Harderschen Drüse, wohl um sie rein zu halten. Der Tentakel ist ein Tastorgan; er dürfte im Anschluß an den Tränenapparat des Auges entstanden sein; sein Rückziehmuskel entsteht aus dem inneren geraden Augenmuskel. Von den Augenmuskeln der Amphibien ist das Auftreten eines Retractor bulbi zu erwähnen. Das häutige Labyrinth des Gehörorgans schließt sich im allgemeinen an das der Fische an. Aber schon bei Urodelen ist ein Fortsatz der Papilla acustica lagenae vorhanden, der bei den Anuren als Papilla acustica basilaris selbständig geworden ist; sie liegt in einer eigenen Ausbuchtung des Sacculus in der Nähe der Membrana basilaris, eines sehr dünnen, in einem Knorpelrahmen ausgespannten Teiles der sonst dicken Wandung dieser Ausbuchtung. Scala tympani und vestibuli fehlen. Ductus und Saccus endolymphaticus sind gut entwickelt. Bei den Anuren dehnt sich der Saccus als Kalksack im Cavum cranii bis zur Hypophyse und Paraphyse und nach hinten im Rückenmarkskanal bis zum Sakralwirbel aus; dabei sendet er Ausbuchtungen in die Zwischenwirbellöcher, die (Rana) aus dem Kanal heraustreten können und die Spinalganglien umhüllen. Die Wandung des Saccus besteht aus einem einschichtigen Epithel, dessen Zellen eine milchige Flüssigkeit abscheiden, worin zahlreiche Kristalle von kohlensaurem Kalk schweben. Die funktionelle Bedeutung des Kalksackes ist unbekannt. Das häutige Labyrinth liegt in der gegen das Cavum cranii durch Knorpel geschlossenen Ohrkapsel, die neben perilymphatischem Gewebe ein geräumiges Cavum perilymphaticum enthält, dessen Hauptraum den Sacculus umgibt. Von dem Hauptraum geht eine Ausbuchtung, Ductus fenestrae vestibuli, zur Fenestra ovalis, tritt kaudalwärts durch diese aus der Ohrkapsel und liegt dann unter dem Operculum; sie fehlt den Gymnophionen. Auch geht ein Ductus perilymphaticus zum Cavum cranii, der bei Anuren als Saccus perilymphaticus durch das Foramen jugulare wieder heraustritt bis zu einer festen, im Foramen jugulare externum aus-

gespannten Membran, die der Membrana tympani secundaria der Amnioten entspricht.

Paukenhöhle und schallleitender Apparat kommen den Anuren zu; rückgebildet sind sie z. B. bei Bombinator und Pelobates. Jede Paukenhöhle kommuniziert meist durch eine geräumige Oeffnung mit der Rachenhöhle; bei den Aglossen ist eine, beiden Paukenhöhlen gemeinsame, enge mediane Oeffnung am Munddach vorhanden. Den Urodelen und Gymnophionen fehlen Paukenhöhle und Trommelfell immer; die Gehörknöchelchen sind in sehr einfacher Ausbildung vorhanden. Die Gymnophionen besitzen nur ein kurzes Gehörknöchelchen, den Stapes, das mit großer Fußplatte in der Fenestra ovalis liegt und sich distal mittels Gelenk mit dem Palatoquadratum verbindet; es wird bei einigen Formen über der Fußplatte von einer Arterie durchbohrt. Die Urodelen (Fig. 12) besitzen einen ähnlichen kurzen, aber nicht durchbohrten Stapes, Stilus genannt, mit kleiner Fußplatte, der nur den

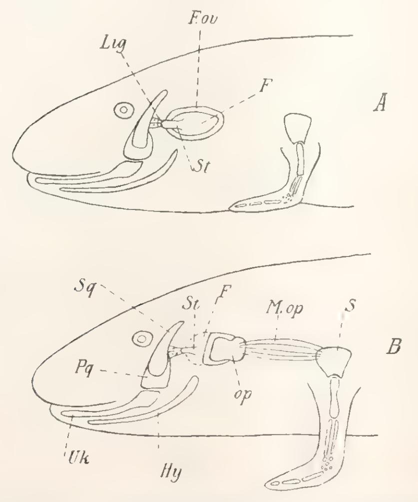


Fig. 12. Gehörknöchelchen der Urodelen; A bei der Larve; B beim erwachsenen Tier; schematisch. Nach Kingsbury and Reed Journ. Morphol. Bd. 20 1909 Fig. 21. F Fußplatte des Stapes; F.ov Fenestra ovalis; Hy Hyoidbogen; Lig Ligament; M.op Musculus opercularis; op Operculum; Pq Palatoquadratum; S Schulterblatt; Sq Squamosum; St Stilus; Uk Unterkiefer.

vorderen Teil der Fenestra ovalis bedeckt, und dem sich nach hinten ein 2. Skelettstück, das Operculum, anschließt, eine große ovale Knorpelscheibe, die den perilymphatischen Ductus fenestrae vestibuli bedeckt. Der Stapes ist mit seinem distalen Ende direkt oder durch Band am Palatoquadratum befestigt; er ist sehr verschieden entwickelt, verliert sehr oft seine Selbständigkeit gegen das Operculum oder die Ohrkapsel, oder er ist ganz geschwunden. Ob das Operculum etwas mit der Uebertragung von Schallwellen zu tun hat, ist sehr fraglich; es besitzt aber durch den Musculus opercularis (Teil des Musculus levator scapulae), der von ihm entspringt und an das Schulterblatt ansetzt, eine sehr eigentümliche Verbindung mit den Gliedmaßen, die sicher irgendeine funktionelle Bedeutung hat. Auf diesem Wege könnten während des Landlebens durch die vorderen Gliedmaßen Erschütterungen des Bodens auf das Labyrinth übertragen werden. Das Operculum fehlt den Urodelenlarven (Fig. 12 A); diese haben immer einen Stapes, der sich dem Squamosum anlegt und so einen Weg für die Schallwellen bildet. Die Ichthyoden verhalten sich im allgemeinen wie die Larven. Die Anuren besitzen eine typische Columella auris (Plectrum Gaupp) und ein Operculum; dieses fehlt vielleicht den Aglossen. Die Columella auris ist ein schlanker Stab, dessen medialer Teil verknöchert (Stapes) und dessen lateraler, knorpelig bleibender Teil die Verbindung mit dem Trommelfell vermittelt. Ein im Trommelfell liegender Abschnitt kann als knorpeliger Discus eine gewisse Selbständigkeit besitzen. Das Trommelfell ist in einem, vom Palatoquadratum aus entstehenden, knorpeligen Annulus tympanicus ausgespannt. Das Operculum hat wohl dieselbe Funktion wie bei Urodelen, da eine Portion des Musculus levator scapulae von ihm entspringt, während die eigentlichen Schallwellen durch die Columella auris geleitet werden. Den Larven der Anuren fehlen Trommelfell und Columella auris gänzlich; sie bilden sich erst bei der Metamorphose; das Operculum entsteht lange vor derselben.

Die Homologie des schalleitenden Apparates ist strittig. Nach neuesten Untersuchungen (Kingsbury and Reed) ist das Operculum sicher eine aus der Ohrkapsel entstandene Neubildung, die der Fußplatte des Stapes der Amnioten nicht vergleichbar ist. Der Stilus der Urodelen entspricht dem Stapes, das Plectrum der Anuren der ganzen Columella auris der Sauropsiden (nach Gaupp nur dem inneren Teil). Sie entstehen nicht aus der Ohrkapsel, zeigen aber bisweilen (Gymnophionen, Marcus Morphol. Jahrb. Bd. 40 1909, und undeutlich bei einigen Urodelen) embryonal einen Zusammenhang mit dem Zungenbeinbogen und dürften hyalen Ursprungs sein, homolog dem Hyomandibulare der Fische.

Das Fehlen eines typischen schalleitenden Apparates (mit Trommelfell) bei Gymnophionen und Urodelen ist oft als primitiver Zustand gedeutet worden. Die gute Ausbildung dieses Apparates bei den Anuren und bei einigen Stegocephalen spricht aber dafür, daß bei den Urodelen Rückbildung vorliegt, und dies dürfte auch bei

Gymnophionen, unter dem Einfluß der grabenden Lebensweise, der Fall sein.

2g) Der Darmkanal. Die Mundrachenhöhle ist geräumig; ihr Dach wird von der primären Schädelbasis gebildet, ein sekundärer Gaumen fehlt. Die Zunge ist entweder dem Mundhöhlenboden ganz angewachsen und weist dann nur am Rande einige Beweglichkeit auf (Gymnophionen; einige Urodelen), oder sie kann vorgestülpt werden, meist dadurch, daß sie hinten frei ist und umgeklappt wird; sie dient dann zum Fangen kleiner Insekten, die an ihr kleben bleiben; unter Wasser hat sie keine Bedeutung, und dies macht es verständlich, daß sie bei den permanent wasserbewohnenden Amphibien (Ichthyoden, Aglossen usw.) und bei den Larven meist rudimentär ist. Die Mundhöhle ist sehr reich an Schleimdrüsen, besonders die Zunge; bei Gymnophionen bilden Drüsen den weitaus größten Teil der Zunge. Bei den meisten Amphibien liegt eine große tubulöse Schleimdrüse, Glandula internasalis, vorn am Munddach in einem Hohlraum des Septum nasale (Fig. 23*) oder zwischen den Intermaxillaria; sie hält die Zunge schleimig. Den Ichthyoden und Gymnophionen fehlt sie. Bei Anuren tritt neben den inneren Nasenöffnungen eine Rachendrüse auf. Eigentliche Speicheldrüsen fehlen den Amphibien.

Die Zähne der Amphibien sind meist klein, konisch, oft etwas gebogen; sie sind hohl, sitzen nicht in tiefen Alveolen, sondern sind den Knochen nur angewachsen und werden zeitlebens gewechselt. Sie stehen meist auf Prämaxillare, Maxillare, Vomer, Palatinum, Dentale und Spleniale. Parasphenoidzähne haben die Plethodontiden (Fig. 23 B) und ganz vereinzelte Anuren (Triprion; bisweilen Pelobates cultripes). Die Anuren haben meist keine Zähne im Unterkiefer, einige sind ganz zahnlos.

Ein geräumiger, aber meist kurzer Oesophagus führt zum Magen, gegen den er durch eine schwache Einschnürung oder gar nicht abgesetzt ist; doch lassen sich durch die Drüsen der Schleimhaut die Grenzen des Magens mikroskopisch genau bestimmen. Der Magen (Fig. 13 Ma) ist groß und liegt, etwas nach links gerückt, der Körperachse parallel; das Pylorusende biegt nach rechts ab. Der Pylorus (Fig. 13 Py) wird durch einen starken Sphincter angedeutet. Daran schließt sich der dünnwandige Mitteldarm an, dessen vorderer Abschnitt, das Duodenum, eine verschieden starke Schlinge rechts vom Magen nach vorn bildet (Fig. 13 Du), um dann ohne merkliche Grenze in den Dünndarm überzugehen, der bei Formen mit gedrungener Körperform (Anuren), aber auch bei einigen Urodelen, sehr stark gewunden ist, bei gestreckten Amphibien (Proteus, Gymnophionen) nahezu gerade durch die Leibeshöhle zieht. Gelegentlich treten im Dünndarm komplizierte Falten auf. Der bei Urodelen ziemlich lange Enddarm (Rektum) ist innen meist durch einen deutlichen faltenartigen Vorsprung gegen den Mitteldarm abgesetzt und auch weiter als dieser; oft bildet er im Anfang eine Ausbuchtung, die ein kurzes, nicht besonders abgesetztes Cöcum darstellt; ein eigentlicher Blinddarm fehlt. Der Enddarm mündet in die Kloake.

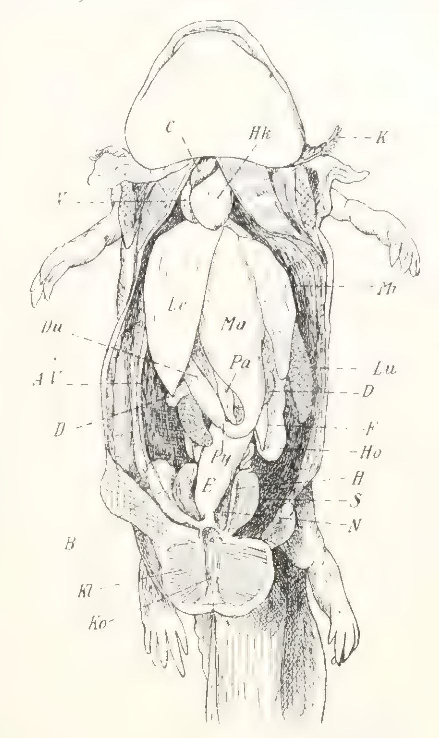


Fig. 13. Eingeweide vom Axolotl-Männchen. AV Abdominalvene; B Harnblase; C Conus arteriosus; D Darm; Du Duodenum; E Enddarm; F Fettkörper; H Harnleiter; Hk Herzkammer; Ho Hoden; K Kieme; Kl Kloakenlippen; Ko Kloake; Le Leber; Lu Lunge; Ma Magen; Mi Milz; N Niere; Pa Pankreas; Py Pylorus; S Samenblase; V Vorhof. Vergrößerung × 3/4.

Die Bauchspeicheldrüse (Pankreas) liegt als kompakte Drüse in der vom Magen und Duodenum gebildeten Schlinge (Fig. 13). Neben der üblichen Ausmündung (mit oft zahlreichen Pankreasgängen) in den Ductus choledochus oder in dessen Nähe direkt in das Duodenum, findet sich bei Urodelen dicht hinter dem Pylorus eine zweite Ausmündung in das Duodenum.

Die umfangreiche Leber (Fig. 13) hat je nach der Körpergestalt eine recht verschiedene Form; in der Breite entwickelt

und zwei- oder dreilappig ist sie bei Anuren, länglich und weniger vollkommen in Lappen geteilt bei Urodelen, während die bei den Gymnophionen ein langgestrecktes, bisweilen in zahlreiche, hintereinander liegende Läppchen geteiltes Organ darstellt. Eine Gallenblase ist vorhanden; der Ductus choledochus mündet ziemlich weit vom Pylorus in das Duodenum.

2h) Die Lungen der Amphibien sind paarige Säcke, deren dünne Wandung innen Falten bilden kann; sie münden in einen unpaaren Hohlraum, der sich durch den Kehlkopf in die Mundhöhle öffnet. Die Amphibien verschlucken Luft und pressen sie dann in die Lungen; eine typische Atembewegung des Rumpfes findet beim Fehlen von Rippen und Zwerchfell nicht statt (Gaupp Arch. Anat. Phys. Anat. Abt. 1896). Das sehr einfache Kehlkopfskelett der Urodelen kann lediglich aus einer paarigen Knorpelspange bestehen. Komplizierter wird es bei Anuren, womit die Fähigkeit der Stimmerzeugung zusammengeht. Verstärkt wird die Stimme der Männchen vieler Anuren durch die Schallblasen (Fig. 14), die voll Luft gepreßt als Resonatoren fungieren. Es sind meist paarige Aussackungen der Schleimhaut des Mund-

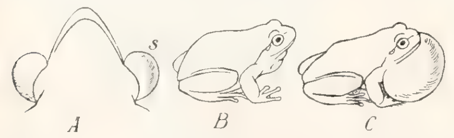


Fig. 14. A Schallblasen (S) von Rana esculenta gefüllt. B unpaare Schallblase von Hyla arborea leer und C gefüllt; bei B sind die Lungen mit Luft gefüllt, die bei C in die Schallblase gepreßt worden ist. Nach Boulenger Les Batraciens 1910 Fig. 24 25. Verkleinert.

höhlenbodens, die sich sehr weit in den subdermalen Lymphräumen ausdehnen können. Wenn sie fehlen, dient der Mundboden als Resonanzorgan, doch ist die Stimme dann schwach. Den Urodelen fehlt beinahe immer eine Stimme. Eine längere Trachea haben die Gymnophionen und einige Urodelen. Die eine der beiden Lungen der Gymnophionen, einmal die linke, ein andermal die rechte, ist stark rückgebildet.

Bei den Urodelen ist die Bedeutung der Lungen als Atmungsorgane sehr gering. Bei einigen wasserbewohnenden Arten (Molge, Proteus) reichen die innen ganz glatten, stark verlängerten Lungen bis hinten in die Leibeshöhle und sind wohl nur als hydrostatische Organe wichtig. Bei den weitaus meisten landbewohnenden Urodelen fehlen die Lungen vollständig, meist auch der Kehlkopf (alle Plethodontiden, Molge rusconii und montana) oder sind stark rückgebildet (Salamandrina, Ambystoma opacum). Diese eigentümliche Rückbildung bei Landsalamandern findet ihre Erklärung wahrscheinlich darin, daß diese Tiere von Urodelen abstammen, bei denen die Lungen nur noch als hydrostatische Organe Bedeutung hatten und dann beim Landleben natürlich ganz funktionslos wurden. Die lungenlosen Urodelen atmen durch die Haut und die Schleimhaut der Mundrachenhöhle, in der bei einigen ein sehr dichtes epitheliales Kapillarennetz nachgewiesen wurde. Eine kräftige Hautatmung besitzen alle Amphibien; sie hat den Vorzug, sowohl auf dem Lande als auch unter Wasser funktionieren zu können. Auch der Mundrachenraum hat meist Bedeutung als Atmungsorgan.

Die Larven der Amphibien besitzen jederseits 3 äußere Kiemen, verästelte oder gefiederte Anhänge der Kiemenbogen (Fig. 18). Da ganz ähnliche Kiemen bei den Larven von Lungenfischen und bei Polypterus auftreten, sind die der Amphibienlarven wohl altererbte Gebilde. Kiemenspalten, meist 4, öffnen sich zwischen den Lungenbeinbogen und den Kiemenbogen; ein 5. Spalt wird angelegt, bricht aber nicht durch. Bei Anuren ist auch das Spritzloch ganz kurze Zeit geöffnet; sehr lange erhalten bleibt es bei Hypogeophis (Gymnophione). Bei den Larven der Anuren werden die äußeren Kiemen überwachsen von einer Hautfalte, dem Kiemendeckel (Operculum); die Kiemen werden dann erneuert und stehen als sog. innere Kiemen in einer Reihe auf jedem Kiemenbogen. Die Perennibranchiaten behalten zeitlebens die äußeren Kiemen und Kiemenspalten bei; bei Amphiuma und Cryptobranchus bleibt ein Paar Kiemenspalten erhalten.

2i) Die Kreislauforgane (Fig. 15). Mit dem Auftreten der Lungenatmung geht bei den Amphibien eine Abzweigung des respiratorischen Lungenkreislaufs vom Körperkreislauf Hand in Hand. Doch sind die Anpassungen an diese Sonderung im Herzen unvollkommen. Es sind typisch 2 Vorhöfe vorhanden, aber die trennende Wand ist nur bei Anuren vollständig. Auch ist nur eine Herzkammer vorhanden, in die allerdings zahlreiche Muskellamellen und Balken vorragen, die eine Mischung des aus den Körper- und den Lungenvenen kommenden Blutes doch sehr einschränken. Und die großen Arterien verlassen zwar alle zusammen durch einen äußerlich einheitlichen Conus (Bulbus cordis) und Truncus arteriosus das Herz, aber innerlich wird durch die Ausbildung von Klappen, Wülsten und Scheidewänden doch auch hier, am vollkommensten bei Anuren, eine Mischung beider Blutmengen annähernd verhindert und das venöse Körperblut den

Lungen, das arterielle Lungenblut dem Körper zugeführt. Allerdings wird dem venösen Körperblute, bevor es in das Herz gelangt, eine ansehnliche Menge arteriellen Blutes beigemischt, das aus der Haut stammt,

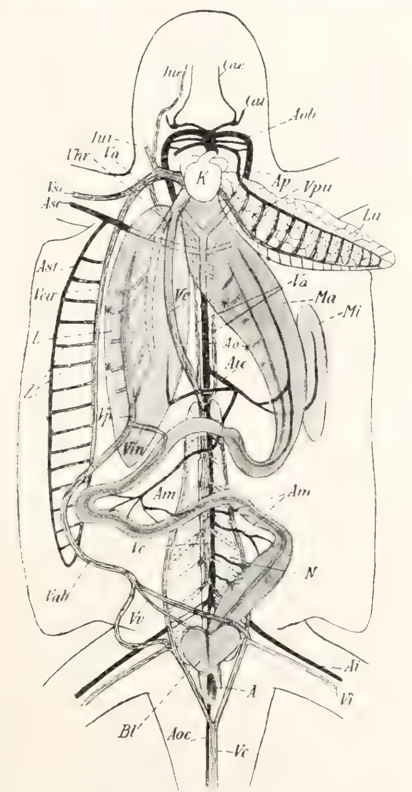


Fig. 15. Blutgefäßsystem einer Urodele. Schema. Arterien schwarz, Venen grau. A After; Ai Arteria iliaca; Aic Arteria intestinalis communis; Am Arteria mesentericae; Ao Aorta descendens; Aob Aortenbogen; Aoc Aorta caudalis; Ap Arteria pulmonalis; Asc Arteria subclavia; Ast Arteria sternalis; Bl Harnblase; Cae Carotis externa; Cai Carotis interna; Jue Vena jugularis externa; Jui Vena jugularis interna; K Herzkammer; L Leber; Lu Lunge; Ma Magen; Mi Milz; N Niere; Va Vena azygos; Vab Vena abdominalis; Vc (im Schwanz) Vena caudalis; Vc Vena cava posterior; Vcu Vena cutanea magna; Vhr Vena hepatica revehens; Vi Vena iliaca; Vin Vena intestinalis; Vp Vena portae hepatis; Vpu Vena pulmonalis; Vsc Vena subclavia; Vv Vena vesicalis; Z Hautkreislauf; * Durchschnittsstellen der Venae gastricae.

die einen sehr kräftigen Kreislauf besitzt (Fig. 15 Z). Bei den Gymnophionen und den meisten Anuren ist es ein Ast der Lungenarterie, die Arteria cutanea, bei den Urodelen ein Ast der Arteria subclavia, die Arteria sternalis, die das Blut der Haut zuführt. Das arterielle Blut kehrt durch die Vena cutanea magna in die Vena subclavia und so in den rechten Vorhof zurück. In diesen gelangt durch die Vena jugularis auch das Blut, das in der Schleimhaut der Mundrachenhöhle arteriell geworden ist. Dadurch ist das Blut, das in diesen Vorhof und dann in die rechte Hälfte der Herzkammer fließt, nicht rein venös, sondern stark gemischt und zwar um so mehr, je besser Haut- und Schlundatmung entwickelt sind. Gewinnen diese das Uebergewicht, indem die Lungenatmung zurücktritt, wie es allgemein bei Urodelen geschieht, so verliert auch die Abtrennung des Lungenkreislaufs vom Körperkreislauf jede Bedeutung. Die Einrichtungen im Herzen, die diese Trennung bewirken sollen, werden nicht weiter vervollkommnet, ja sie treten wieder in Rückbildung, worauf z. B. die große Variabilität in den Klappen und Wülsten des Conus arteriosus bei Molchen hinweist. Bei den lungenlosen Landsalamandern geht diese Rückbildung noch weiter; die beiden Vorhöfe sind, unter Rückbildung des Septums, zu einem einheitlichen Vorhofe vereinigt; die Lungenvene fehlt, die Lungenarterie ist nur in Resten erhalten.

Die großen Arterien (Fig. 15), die aus dem Herzen treten, zeigen eine symmetrische, bogenförmige Anordnung, wie die Kiemengefäße der Fische. Es können 4 Arterienbogen jederseits vorhanden sein. Der vorderste bildet die Wurzel der großen Kopfarterien, der Carotis interna und externa; der 2. Bogen, der weitaus kräftigste, bildet den Aortenbogen; der 3. setzt sich gleichfalls in die Aorta fort, ist aber schwach und fehlt den Anuren und einigen Urodelen; der 4. geht in die Arteria pulmonalis über; ein schwacher Ductus botalli bildet seine eigentliche Fortsetzung zur Aortenwurzel. Vor diesen Bogen werden beim Embryo noch zwei weitere angelegt; die bleibenden entsprechen einem 3. bis 6. Gefäßbogen, die im 1. bis 4. Kiemenbogen der Fische verlaufen.

Bei den Urodelenlarven ist nur in die 3 vorderen Arterienbogen eine Kieme eingeschaltet, und der 4. Bogen ist schwach und funktionslos bis zu der Stelle, wo die Lungenarterie von ihm abzweigt; von dort bis zur Vereinigung mit der 3. Kiemenvene (abführender Teil des 3. Kiemengefäßes) ist der 4. Bogen besser entwickelt, und durch diesen Abschnitt strömt arterielles Blut aus der 3. Kiemenvene zur Lungenarterie; dadurch bekommt die Lunge, die ja noch nicht funktioniert, das nötige arterielle Blut. Die Perennibranchiaten zeigen in den Arterienbogen zwar verschiedene Eigentümlichkeiten, aber doch wesentlich dieselben Verhältnisse wie die Larven; bei Proteus und Necturus ist der 4. Arterienbogen vom Herzen ab bis zur Lungenarterie rückgebildet, eine Gefäßstrecke, die ja, da die Lungenatmung ausbleibt, nie mehr zu funktionieren braucht (Boas Morphol. Jahrb. Bd. 7 1882).

Bei Gymnophionen ist das Herz ziemlich weit

nach hinten verschoben und die Arterienbogen sind sehr lang geworden.

Das Venensystem (Fig. 15) schließt sich an das der Lungenfische an. Ein Nierenpfortadersystem ist gut ausgebildet; hintere Kardinalvenen sind bei Urodelen und vereinzelt bei Anuren (Bombinator) als paarige oder unpaare Venae azygeae gut entwickelt. Es bestehen eine typische V. cava posterior und eine Abdominalvene (Hochstetter Morphol. Jahrb. Bd. 13 1887; Seelye Proc. Boston Soc. Nat. Hist. Bd. 32 1906). Die roten Blutkörperchen sind sehr groß; sie haben einen Durchmesser von über 20 μ, oft einen weit größeren, bei Amphiuma sogar von 75 μ. Die Zahl der Blutkörperchen ist gering. Die Form ist oval mit ziemlich großem Kern.

2k) Das Lymphgefäßsystem. Ihm fehlt eine eigene bindegewebige oder muskulöse Wandung beinahe gänzlich. Sonst ist es gut entwickelt, sowohl in der Form eines subvertebralen Längsstammes als unter der Haut, wo besonders die Anuren sehr große Lymphräume besitzen, voneinander getrennt durch schmale Septa, in denen Kommunikationsöffnungen liegen. Wo die Lymphbahnen sich in die Venen öffnen, liegen kleine Lymphherzen. Bei Urodelen und Gymnophionen befindet sich auf beiden Körperseiten unter der Haut eine Reihe kleiner Lymphherzen, die bei diesen deutlich intersegmental geordnet sind (Marcus Morphol. Jahrb. Bd. 38 1908); eine ähnliche Anordnung kommt am Schwanze der Anurenlarven vor, nach Leydig auch am Rumpfe von Ceratophrys. Rana hat 2 Paar Lymphherzen, ein vorderes neben dem 3. und 4. Wirbel, ein hinteres jederseits vom Steißbein beim After. Hemisus hat jederseits 3 hintere Lymphherzen (Beddard Proc. Zool. Soc. London 1908 2). Ein eigentümliches zentrales Lymphherz fand Greil (Verhandl. Anat. Ges. Heidelberg 1903) am Truncus arteriosus bei Urodelen. Eigentliche Lymphdrüsen fehlen den Amphibien; die Bildung der farblosen Blutzellen findet in der Thymus statt. Diese ist ein kleines, meist einheitliches Organ, das jederseits in der Nähe des Kiefergelenkes liegt. Die Milz liegt entweder beim Magen oder mehr dem Rektum genähert (Fig. 13).

2l) Das Urogenitalsystem. Die Nieren der Urodelen (Fig. 16) und Anuren sind ansehnliche, ziemlich breite Organe; sehr lang gestreckt und schmal sind sie bei den Gymnophionen. Am Außenrande jeder Niere verläuft ein Harnleiter, der meist in geringen Abständen nacheinander die Harnkanälchen aufnimmt und in die Kloake mündet. Eine Harnblase ist als dünnwandige Ausstülpung der ventralen Kloakenwandung vorhanden (Fig. 15 Bl). An der Oberfläche der Niere liegen meist zahlreiche Wimpertrichter (Nephrostome), die in der Regel eine Verbindung der Leibeshöhle mit den Nierenkanälchen bilden; nur bei den erwachsenen Anuren haben die Wimpertrichter alle oder beinahe alle die Verbindung mit den Nierenkanälchen aufgegeben und münden in die Venen (Wurzeln der Vena cava). Bei den Embryonen ist eine recht gut entwickelte Vorniere

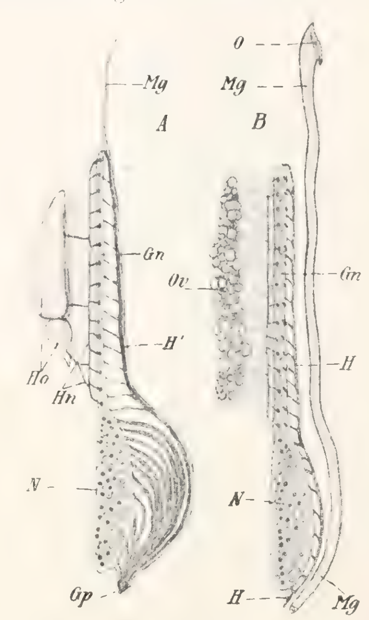


Fig. 16. Schema des Urogenitalsystems einer männlichen (A) und einer weiblichen (B) Urodele. Nach Spengel Arb. Zool. Instit. Würzb. Bd. 3 1876 Tab. 3 Fig. 2—3. Gn Geschlechtsniere; Gp Urogenitalpapille; H Harnleiter; H' Harnsamenleiter; Hn Hodennetz; Ho Hode; Mg Müllerscher Gang; N Niere; O Ostium tubae; Ov Ovarium. Die Kreise mit einem Punkte in der Mitte ⊙ und die Fähnchen in der Geschlechtsniere stellen die Nephrostome dar, die dunklen Kreise die Malpighischen Körperchen.

(Pronephros) vorhanden, mit äußerem Glomus; ihr Ausführgang ist das vordere Ende des Harnleiters. Die eigentliche Niere ist eine Urniere (Mesonephros); sie zeigt dementsprechend bei den männlichen Tieren Beziehungen zu den Gonaden, indem der Samen durch Niere und Harnleiter entleert wird; dieser ist bei den Männchen Harnsamenleiter (Fig. 16). Er kann in der Brunstzeit Erweiterungen oder Aussackungen seines Endabschnittes aufweisen, die als Samenbläschen zur Aufbewahrung des Spermas dienen.

Pori abdominales fehlen den Amphibien.

Die Gonaden sind dem medialen Rande der Nieren angeheftet. Bei den

männlichen Tieren stehen sie durch die Vasa efferentia testis, feine Kanälchen, die durch Querkanäle zu einem deutlichen Hodennetze (Fig. 16) werden können, mit den Nieren in Verbindung; auf diesem Wege gelangt der Samen in die Nierenkanälchen; einige Anuren machen hiervon eine Ausnahme, indem das, gelegentlich mehr oder weniger vereinfachte, Hodennetz direkt in den Harnleiter (Discoglossus) oder gar (Alytes) in einen besonderen Gang mündet. Die meisten Anuren zeigen in dieser Beziehung Uebergangszustände. Bei den Urodelen dient nur ein vorderer, schlanker Abschnitt der Nieren als „Geschlechtsniere" der Abfuhr des Samens; er ist auch bei den Weibchen erkennbar. Ein rudimentäres Hodennetz kommt auch den weiblichen Amphibien zu.

Die Eier werden von dem meist ganz vorn, an der Wurzel der Lungen, liegenden Tubentrichter (Ostium) des Eileiters (Müllerscher Gang) aufgenommen und in die Kloake geführt, in die beide Eileiter getrennt einmünden. Bei den Anuren und einigen viviparen Urodelen und Gymnophionen kommt eine Erweiterung des hinteren Abschnittes des Eileiters zum Uterus vor. Merkwürdig gut entwickelt ist der Müllersche Gang bei vielen männlichen Amphibien; er besitzt nicht selten noch ein Ostium.

Bei den Gonaden liegt der paarige Fettkörper, der sich aus einem Teil der Genitalleiste, der Anlage der Gonaden, entwickelt, und auch Urgeschlechtszellen enthalten kann. Er besteht in der Hauptsache aus dicht gedrängten Fettzellen. Die Größe schwankt mit dem Ernährungszustande der Tiere; das Reservematerial dient an erster Stelle den Gonaden während der Bildung der Geschlechtszellen.

Die Amphibien sind normal stets getrenntgeschlechtlich; Hermaphroditismus ist nur gelegentlich beobachtet worden. Bei vielen jungen Fröschen (Rana) fängt die Gonade zunächst an, sich zu einer weiblichen auszubilden; dann aber wandelt sie sich nachträglich noch in eine männliche um; sie hat dabei eine Zeitlang hermaphroditischen Charakter (sogenannte intermediäre Drüse).

Es sei hier auch des Bidderschen Organes mancher Bufo-Arten gedacht, des vorderen Abschnittes sowohl der männlichen als auch der weiblichen Gonaden, der voller Oocyten ist, die nicht zu ausgebildeten Eiern heranwachsen. Die Größe schwankt sehr nach der Jahreszeit; die Bedeutung ist unklar.

Die Befruchtung kommt entweder dadurch zustande, daß eine Besamung stattfindet in dem Augenblicke, wo die Eier abgelegt werden (Anuren, wahrscheinlich Cryptobranchus und Megalobatrachus), oder sie ist eine innere. Den Gymnophionen dient die ausstülpbare Kloake der Männchen als Begattungsorgan. Dagegen fehlt ein solches bei den Urodelen; die Männchen setzen eine, von den Drüsen der stark verdickten Kloakenwandung gebildete Spermatophore ab, von der dann das Weibchen mit den gleichfalls verdickten Kloakenlippen den Samen abnimmt, der vermutlich in die als Receptaculum seminis dienenden Kloakendrüsen kommt und dort einige Zeit aufbewahrt bleiben kann. Bei zwei lebendig gebärenden Fröschen (Pseudophryne vivipara und Nectophryne tornieri) wird die Befruchtung wohl eine innere sein, vielleicht auch bei Pipa.

2m) Die Unterschiede der Geschlechter sind bei den Amphibien gering; das Geschlecht ist manchmal äußerlich nicht festzustellen. Nur in der Paarungszeit ist dies allerdings meist möglich; es treten dann Brunstveränderungen der Haut ein; diese ändert ihre Farbe oder bekommt eine warzige Oberfläche (Brunstwärzchen weiblicher Anuren). Vielleicht gehören hierher auch die „Haare" von Trichobatrachus. Besondere Anpassungen treten auf, wenn die Männchen bei der Paarung die Weibchen umklammern; so die Daumenschwielen (Fig. 17) der männlichen Anuren, drüsenreiche, mit dornartigen Wärzchen (Hautkämmen) bedeckte Hautverdickungen des Daumens und ersten Fingers. Hautkämme können auch an anderen Stellen der Vorder- und Hintergliedmaßen und an der Brust auftreten (Fig. 17). Auch kommen knöcherne Sporne an der Hand und hornige Dornen an der Brust vor. Sie sichern den Männchen einen festen Halt an den Weibchen während der oft Tage, ja Wochen dauernden Umklammerung, wobei die Männchen auf dem Weibchen sitzen und diese hinter den Vorderextremitäten oder vor den hinteren Gliedmaßen mit den Armen umfassen. Solche Hautkämme kommen gelegentlich auch bei



Fig. 17. Vorderextremität und Brust mit Hautkämmen bei einem brünstigen Männchen von Rana liebigi. Nach Boulenger Catal. Batrachia Salientia British Mus. 1882 S. 22. ds Daumenschwiele; h Hautkamm auf der Brust. Verkleinert.

Urodelen vor (Molge waltlii und viridescens).

2n) Die Geschlechtsprodukte. Die Spermien der Urodelen sind recht groß (z. B. bei Spelerpes 0,7 mm); bei den Anuren sind sie meist nur etwa 0,1 mm lang, erreichen aber bei Discoglossus beinahe 3 mm. Der Bau ist manchmal sehr kompliziert; die Spermien der Urodelen und einiger Anuren besitzen eine undulierende Membran.

Die rundlichen Eier messen bei den Anuren meist nur 1 bis 2 mm; etwas größer, bei den größeren Arten sogar erheblich größer, sind sie bei den Urodelen (bei Megalobatrachus 7 mm). Die Größe der Eier ist vor allem von der Dottermenge abhängig. Bei verschiedenen Amphibien, wo das freie Larvenstadium unterdrückt ist und die Jungen als fertige, wenn auch kleine, Tiere ausschlüpfen, sind die Eier besonders dotterreich und groß; so hat die Gymnophione Hypogeophis rostratus Eier von 7 bis 8 mm Durchmesser. Die Zahl der Eier, die von einem Weibchen abgelegt werden, ist meist groß; so sind bei Bufo bis 12 000 Eier in einem Gelege gefunden worden, bei Rana bis 10 000. Bei den Formen mit dotterreichen großen Eiern ist die Zahl viel geringer; so legt die Urodele Plethodon cinereus 3 bis 12 Eier, die Gymnophione Hypogeophis rostratus 6 bis über 30. Die Eier werden umgeben von einer, in den Ovidukten gebildeten, Gallerthülle, die sehr dick und resistent sein kann. Entweder werden die Eier jedes für sich in einer eigenen Hülle abgelegt (die meisten Urodelen; die Anuren Xenopus, Discoglossus, Bombinator) oder sie werden durch die Hüllen verbunden und bilden einen Laich (Synoion). Dieser kann rosenkranzförmig sein (Megalobatrachus, Cryptobranchus, Amphiuma; einige Frösche wie Alytes; Gymnophionen) oder die Eier bilden einen Klumpen (Rana) oder sie liegen dicht zusammen in einer oder zwei Längsreihen in dem überall gleich dicken Gallertstrang (z. B. bei Bufo).

Am Ei kann man einen dotterarmen Bezirk, worin der Kern liegt, als animalen Pol unterscheiden; in der Regel ist dieser pigmentiert, doch kann die Pigmentbildung bei Tieren, die ihre Eier im Dunkeln ablegen und bei viviparen Formen unterbleiben.

3. Embryologie. Die Furchung der Eier ist eine inäquale totale. Sie kann im einzelnen, sogar bei derselben Art, verschieden verlaufen und ist von der sehr schwankenden Größe und dem Dotterreichtum abhängig. Es entsteht eine Blastula mit zahlreichen kleinen Zellen am animalen Pole und einem aus größeren, unregelmäßigen dotterreichen Zellen bestehenden vegetativen Teil, getrennt durch die Furchungshöhle. Die Gastrulation findet teilweise durch Einstülpung unter Bildung einer engen Urdarmhöhle statt, teilweise durch Umwachsung des Entoderms (Dotters) durch das Ektoderm. Die Urdarmhöhle eröffnet sich meistens in die Furchungshöhle, die dann zum Urdarm hinzugezogen wird. Bei sehr dotterreichen Eiern (Salamandra; Alytes; Gymnophionen) ist die Trennung in eine aus embryonalen Zellen bestehende Keimscheibe und die nicht immer sicher in Zellen geteilte Dottermasse in beinahe derselben Schärfe wie bei Reptilien durchgeführt.

Der Embryo liegt zunächst auf der rundlichen Dottermasse, aber mit zunehmender Größe des Embryo und Verbrauch des Dottermateriales wird der Dotter allmählich in den Embryo aufgenommen. Embryonalhüllen fehlen; die Harnblase bleibt im embryonalen Cölom, wird nur schwach vaskularisiert und wird nicht zu einer Allantois. Ebenso fehlt ein Amnion (von Megalobatrachus beschreibt Ishikawa, Mitteil. Deutsch. Ges. Nat. u. Völkerk. Ostasiens Bd. 11, 1908 eine vordere Amnionfalte). Die Embryonen finden genügenden Schutz in den Gallerthüllen; sie liegen in deren Innerem in einer zuerst etwas zähen, später dünnflüssigen Gallerte. In den späteren Embryonalstadien entstehen die äußeren Kiemen (Fig. 18) und kommen die Kiemenspalten zum Durchbruch. Bei den Embryonen vieler Urodelen entsteht jederseits am Kopfe ein steifes, tentakelartiges Organ, das Rusconische Häkchen (Fig. 18 r); vielleicht dient es dazu, ein Versinken des schweren Kopfes der Larven im Schlamm zu verhindern. Es bleibt meist während des ganzen Larvenlebens erhalten.

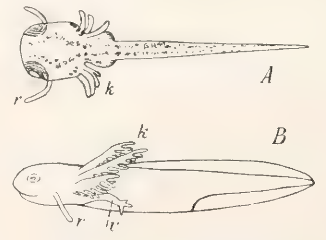


Fig. 18. A Eben ausgeschlüpfte Larve von Molge paradoxus vom Rücken. Nach v. Bambeke Arch. Biol. Bd. 1 1880 Tab. 11 Fig. 22. B Larve von Ambystoma punctatum. Nach Cope, Batrachia North America 1889 Tab. 18 Fig. 4a. k äußere Kiemen; r Rusconisches Häkchen; v vordere Extremität. Vergrößert.

4. Verwandlung. 4a) Larven. Meist schlüpft das Tier auf noch ziemlich unvoll-

kommener Entwickelungsstufe aus und fängt ein freies Larvenleben an. Die Larven der Urodelen sind den erwachsenen Tieren ähnlich. Sie behalten die äußeren Kiemen bei. Die freilebenden Larven der Gymnophionen sind wurmförmig, schwanzlos, wie die erwachsenen; sie besitzen keine Kiemen, wohl aber zwei (?) Kiemenspalten (die 3. und 4.) im Grunde einer Grube.

Die Larven der Anuren, Kaulquappen genannt, werden auf einem sehr frühen Entwickelungsstadium frei; sie haben dann noch keine Gliedmaßen und Augen und einen rudimentären Schwanz (Fig. 19). Sie er-

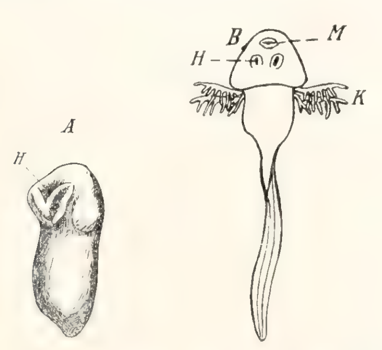


Fig. 19. A Embryo von Bufo vulgaris kurz vor dem Ausschlüpfen. Nach Thiele Zeitschr. wiss. Zool. Bd. 46 1887 Tab. 10 Fig. 3 d. B Junge Larve von Rana. Nach Boas Lehrb. d. Zool. 6. Aufl. Jena 1911 Fig. 487 B. H Haftorgan; K Kiemen; M Saugmund. Vergrößert.

nähren sich zunächst von den Gallerthüllen des Eies, woran sie sich festkleben, nicht festsaugen, mit Hilfe des zuerst unpaaren, später oft paarigen Haftorganes, der sogenannten Saugscheibe. Im Boden dieses Haftorganes liegen Haftdrüsen. Diese Larven bewegen sich wohl nur mit Hilfe ihres gut entwickelten Wimperkleides. Bald bildet sich der Saugmund aus, der bewaffnet ist mit Hornplättchen und zahlreichen Hornzähnchen, die aus verhornten Epidermiszellen bestehen; die Zähnchen werden fortwährend gewechselt. Es entsteht der Ruderschwanz und die Larven heften sich nun mit ihrem Saugmunde an faulenden Pflanzenteilen oder tierischen Resten fest, wovon sie sich ernähren, indem sie diese Substanzen mit ihren Zähnchen wie mit einer Feile zerreiben; auch fressen sie wohl Schlamm. Der Haftapparat wird meist rückgebildet, bleibt aber bei verschiedenen tropischen Formen bis zur Verwandlung erhalten. Bald treten Kiemenspalten und die 3 äußeren Kiemen (Fig. 19 B) auf, die aber nach einiger Zeit von einem Operculum bedeckt werden, so daß jederseits eine Kiemenhöhle mit Oeffnung (Spiraculum) entsteht (Fig. 20). Paarig bleibt das Spiraculum bei Pipa, Xenopus und Microhyla; beide Oeffnungen verwachsen zu einem medianen Spiraculum bei Discoglossiden; meist schwindet das rechte Spiraculum und beide Kiemenhöhlen münden durch das linke nach außen. Die alten Kiemen werden resorbiert, und auf allen 4 Kiemenbogen treten zahlreiche neue, kleine Kiemenbäumchen auf, die sogenannten inneren Kiemen. An der Schlundfläche der Kiemenbogen ent-



Fig. 20. Larve von Bombinator von unten mit geöffneter Bauchhöhle. Nach Goette Entwickelungsgeschichte der Unke Leipzig 1875 Tab. 20 Fig. 357. A After; D Spiraldarm; H Haftorgan; Sm Saugmund; Sp Spiraculum (später unpaar, median). Vergrößert.

wickeln sich weit in den Schlund vorspringende Falten, Siebplatten, die einen Filterapparat bilden, der es verhindert, daß mit dem Atemwasser feste Teile in die Kiemenhöhlen gelangen (F. E. Schulze Abhandl. Akad. Berlin 1892). Der Darm verlängert sich sehr erheblich und wird in einer Spirale angeordnet (Fig. 20). So ist die Larve zur typischen Kaulquappe geworden, mit dickem eiförmigem Körper, an dem sich eine Grenze von Kopf und Rumpf nicht bemerkbar macht, und einem großen, flachen Ruderschwanz. Gliedmaßen fehlen zunächst, die hinteren aber treten bald hervor; auch die vorderen werden angelegt, bleiben aber bis zur Metamorphose von der Opercularfalte verdeckt.

Die Kaulquappen tropischer Frösche zeigen manchmal Eigentümlichkeiten; unsere Kenntnisse von ihnen sind aber noch sehr gering. Erheblich modifiziert sind die älteren Kaulquappen von Xenopus (Fig. 21).

Am Ende des freien Larvenlebens findet eine schnelle Umbildung der Larven zu den erwachsenen Tieren statt, eine Verwandlung oder Metamorphose, wodurch die Tiere zum Landleben geeignet werden. Die Verwandlung besteht im wesentlichen in einer Umbildung der Atmungsorgane und im Zusammenhang damit des Kreislaufes, des Kiemenbogenskeletts und seiner Muskulatur; die Kiemen werden resorbiert, die Kiemenspalten schließen sich. Bei den Urodelen und Gymnophionen, wo die Larven den erwachsenen Tieren ähnlich sind, beschränkt sich die Verwandlung daneben auf mehr geringfügige Umbildungen. Bei den Urodelen ist hervorzuheben: andere Anordnung der Gaumenknochen und des Gebisses; Abwerfen des Spleniale; bessere Ausbildung der Bauchmuskulatur; Bildung beweglicher Augenlider; Umbildungen am schalleitenden Apparate; die Zunge wird meist ausstülpbar,

der Schwanzsaum und damit der Ruderschwanz gehen meist verloren; auch tritt die farbige Zeichnung der erwachsenen auf. Die Lungen kommen schon lange vor der Metamorphose zur Ausbildung, ihr Kreislauf tritt aber erst mit ihr in Tätigkeit.

Sehr erheblich ist die Verwandlung bei den Anuren. Dies liegt zunächst daran, daß die erwachsenen Tiere, in Zusammenhang mit ihrer hüpfenden Fortbewegung, eine gedrungene Körperform und allerlei Spezialisierungen des Skelettes und der Muskulatur aufweisen, die den Larven abgehen. Dazu kommt nun aber, daß auch die weit gehenden Spezialisierungen der Larven dabei rückgängig gemacht werden müssen. Es müssen der Schwanz und der Kiemenapparat resorbiert werden; der Saugmund wird unter beträchtlichen Umbildungen von Teilen des Kopfskelettes zu einem meist weiten Maul mit normalen Kiefern; der Darmkanal wird ganz neu aufgebaut; Paukenhöhle und schallleitender Apparat treten auf. Auch fängt erst jetzt die Verknöcherung des Skelettes an, die bei den Larven auf einige Kopfknochen beschränkt war.

Die Larven der Amphibien werden meist ¼ bis ⅓ so lang wie die erwachsenen Tiere; es entsteht bei der Verwandlung ein kleines Individuum, das noch sehr beträchtlich wachsen muß, bis es die definitive Größe erreicht hat und sich fortpflanzt. Manchmal aber werden die Larven größer, so daß die Tiere nach der Verwandlung nicht viel kleiner sind als die erwachsenen (z. B. Chondrotus tenebrosus) und bald geschlechtsreif werden. Interessant ist, daß bei Pseudis paradoxa, einer Anure, die Larve bis 23 cm Länge erreicht, während der erwachsene Frosch nur 6 cm lang und auch sehr viel schlanker ist als die Larve.

4b) Neotenie. Gelegentlich unterbleibt die Verwandlung zum richtigen Zeitpunkte; so entstehen 2, 3 Jahre alte Larven, die viel größer werden als gewöhnlich, wie das bei verschiedenen Anuren (Pelobates, Bombinator, Alytes, Hyla, Rana und Bufo-Arten) und Urodelen (Tritonen, Ambystoma-Arten, Salamandra maculosa) beobachtet wurde. Solche Larven können sich später noch verwandeln. Dieses Festhalten des Larvenstadiums hat Kollmann Neotenie genannt. Von neotenischen Urodelenlarven (nicht von Anuren) ist beobachtet worden, daß sie sich fortpflanzen; dann ist die Neotenie vollkommen (Zeller Jahresh. Nat. Ver. Württemberg Bd. 55 1899). Diese vollkommene Neotenie ist bei Ambystoma tigrinum an zwei Fundstellen in Mexiko zur Regel geworden, indem die Larven (Axolotl) an diesen Fundstellen sich nicht mehr verwandeln, sondern sich als Larven fortpflanzen; unter anderen Bedingungen, wie in der Gefangenschaft, kann die Verwandlung wieder auftreten, die an den anderen, zahlreichen Fundstellen dieser Art die Regel ist (Gadow Nature Bd. 67 1903).



Fig. 21. Aeltere 60 mm lange Larve von Xenopus laevis (nach Bles Trans. R. Soc. Edinburgh Bd. 41 1905 Tab. 4). A Arm bedeckt vom Operculum; Af After; S Spiraculum (paarig); T Tentakel.

4c) Ichthyoden. Diese Tatsachen erklären uns die Entstehung der Perennibranchiaten, von Proteus, Necturus und Typhlomolge, wahrscheinlich auch von Siren und Pseudobranchus. Diese Urodelen sind ja ihrem ganzen Baue nach Larven und müssen zweifellos als neotenische Formen gedeutet werden, die ihre Verwandlung ganz aufgegeben haben, wie der Axolotl (Boas Morphol. Jahrb. Bd. 7 1882). Sie sind keine primitiven, den Stammformen der typischen Salamander nahestehenden Formen, denn vieles in ihrem Baue ist nicht primitiv, sondern eben larval (Fehlen des Maxillare; Eigentümlichkeiten der Arterienbogen und des Lungenkreislaufs usw.).

Anders sind die Derotremen (Amphiuma, Megalobatrachus und Cryptobranchus) zu beurteilen; auch sie sind neotenisch, denn sie besitzen larvale Merkmale, aber daneben sind sie in vieler Beziehung wie erwachsene Salamander gebaut, besonders Megalobatrachus. Die Metamorphose ist hier also nicht plötzlich unterdrückt wie beim Axolotl, sondern für einige Organe allmählich unvollkommen geworden, vielleicht unter dem Einflusse eines permanenten Wasser-

lebens, wobei die Verwandlung für verschiedene Organe ihre Bedeutung verlor (Visceralskelett und Zunge; Verschluß der Kiemenspalten; Bauchmuskulatur; Columella auris; Augenlider) und verzögert, schließlich aufgehoben wurde, während sie für andere Organe erhalten blieb. Dieser Prozeß ist bei Cryptobranchus viel weiter vorgeschritten als bei Megalobatrachus (Versluys Naturwiss. Wochenschr. Bd. 8 1909).

4d) Abgekürzte Entwicklung. Oft wird das freie Larvenleben verkürzt oder unterdrückt, nämlich bei Tieren, die ihre Eier auf dem Lande ablegen oder sie mit sich herumtragen. Die Entwickelung wird dann oft beschleunigt und verläuft mehr direkt, indem das Larvenstadium in den Eihüllen nicht oder unvollkommen durchlaufen wird und nahezu fertige, wenn auch sehr kleine Tierchen ausschlüpfen; so bei den Anuren Hylodes martinicensis, Hylella platycephala und Rana opisthodon, die ihre Eier auf dem Lande ablegen, und bei Pipa und Hyla goeldi, die ihre Eier mit sich herumtragen.

Aufgehoben oder verkürzt wird das freie Larvenleben auch bei lebendig gebärenden Formen. Viviparität ist bekannt von Salamandra maculosa, die nach einer Trächtigkeitsdauer von 9 bis 10 Monaten 12 bis 30 ältere Larven von 25 bis 30 mm Länge gebärt, von Salamandra atra, die nach einer Trächtigkeitsdauer von 1½ bis 3 Jahren 2, sehr selten 3 bis 4 fertige Tierchen von etwa 50 mm gebiert, von Spelerpes fuscus, von einigen Gymnophionen (Hypogeophis, Siphonops brasiliensis, u. a.), wo die Jungen als vollkommene Tierchen, und bei Dermophis, wo sie als Larven geboren werden und von 2 Fröschen (Nectophryne tornieri und Pseudophryne vivipara, Krefft Zool. Anz. Bd. 37 1911). Der Olm, Proteus, ist sowohl lebendig gebärend als eierlegend. Die Jungen von Salamandra atra ernähren sich zuerst innerhalb der Eihüllen von ihrem Dottermateriale; dann schlüpfen sie im Uterus aus und ernähren sich von den zahlreichen, nicht befruchteten sogenannten embryotrophen Eiern und zuletzt wahrscheinlich von Stoffen, die die Uteruswandung ausscheidet.

Bei solchen Larven, sowohl von Urodelen wie von Gymnophionen, die ihre Entwickelung ganz oder größtenteils in den Eihüllen durchlaufen, findet die Atmung dennoch durch die äußeren Kiemen statt; diese legen sich den Eihüllen an, werden flach und breit, die Verästelung kann zurückgehen (z. B. bei Plethodon cinereus); in extremen Fällen werden sie, nur in einem Paare vorhanden, zu großen flachen Lappen (z. B. bei Autodax und bei den Gymnophionen Typhlonectes und Siphonops brasiliensis). Auch bei Salamandralarven zeigen die Kiemen Vergrößerung und Abplattung (Fig. 22.).

4e) Brutpflege. Die meisten Amphibien legen ihre Eier im Wasser ab und kümmern sich dann nicht mehr darum. Bei Megalobatrachus und Cryptobranchus aber bewacht das Männchen, bei Necturus das Weibchen die an einer verborgenen Stelle abgelegten Eier. Bei den Formen, die ihre Eier auf dem Lande ablegen, kommt oft Brutpflege vor; von einigen Gymnophionen (Ichthyopis, Hypogeophis u. a.) ist bekannt, daß die Mutter ihre Eier in einer eigens dazu angefertigten Höhle ablegt und sich dann um den Eihaufen rollt; ebenso bei den Urodelen Amphiuma, Desmognathus und einigen Arten von Plethodon; bei Autodax verteidigen beide Eltern die Eier.



Fig. 22. Larve (19½ mm lang) von Salamandra atra mit vergrößerten Kiemen (nach Wunderer Zool. Jahrb. Bd. 29 Anat. 1910 Tab. 32 Fig. 121).

Die Laichmassen der Anuren werden sehr oft von Insekten und Crustaceen gefressen; dazu kommt in den Tropen die Gefahr des Eintrocknens der Pfützen oder von Ueberschwemmungen, die den Laich mitreißen, bis er an ungeeigneten Stellen zurück bleibt. Wir finden denn auch oft, besonders bei tropenbewohnenden Anuren, daß diese Gefahren durch Brutpflege beseitigt werden.

Häufig werden die Eier in einer schaumigen Schleimmasse auf dem Lande ganz offen (Rana tigrina auf Ceylon; Leptodactylus-Arten usw.), unter Steinen oder in einer Höhle (Rhacophorus schlegeli), in unmittelbarer Nähe des Wassers abgelegt. Recht viele baumbewohnende Anuren legen ihre Laichmasse zwischen Blättern verklebt über dem Wasser ab, so daß die Larven aus dem Neste direkt ins Wasser fallen (Phyllomedusa-Arten usw.). Auch sind Fälle bekannt, wo die Kaulquappen sich auf dem Rücken der Männchen festsetzen und so mitgeschleppt werden (z. B. Sooglossus auf den Seychellen; Dendrobates und Phyllobates in Süd-Amerika). Bei Alytes trägt das Männchen die Eierschnur um die Hinterbeine gewickelt mit sich herum und geht erst ins Wasser, wenn die Eier schon Kaulquappen enthalten, die dann die Eihüllen verlassen, worauf der Vater gleich wieder ans Land geht. Bei Hyla goeldi, Hyla evansi und Ceratohyla bubalus tragen die Weibchen

die Eier auf den Rücken geklebt bis die fertigen Tiere ausschlüpfen. Ebenso bei der wasserbewohnenden Pipa, wo die Eier, 40 bis 114, durch die hervorgestülpte Kloake direkt auf den Rücken gebracht werden, während das Männchen durch seine Bewegungen die Eier über den Rücken des Weibchens verteilt; die Rückenhaut wuchert nun und bildet um jedes Ei eine Zelle, worin die Jungen ihre ganze Entwickelung durchlaufen. Bei den Beutelfröschen (Nototrema) kommen die Eier in einen großen, von einer Hautduplikatur gebildeten Brutraum auf dem Rücken der Mutter. Beim baumbewohnenden Frosche Hylambates breviceps aus Kamerun trägt die Mutter ihre Eier im Munde. Bei Rhinoderma darwini nimmt das Männchen die großen Eier, etwa 15, in den Kehlsack; erst die fertigen kleinen Fröschchen verlassen diesen. Die in Bruträumen sich entwickelnden Larven atmen entweder durch die äußeren Kiemen oder ihr Schwanz dient als Atmungsorgan.

5. Biologie. Die Haut der Amphibien ist sehr durchlässig für Wasser, und die Tiere sind daher so empfindlich gegen Trockenheit, daß sie beinahe nur an feuchten Orten leben und das direkte Sonnenlicht meiden. Viele sind Nachttiere. Nur wenige Anuren leben in trockenen Gegenden, wo sie sich während der Trockenperioden dadurch schützen, daß sie sich tief vergraben; Chiroleptes platycephalus (Zentral-Australien) nimmt dabei in seinen Körper, besonders in die Leibeshöhle, so viel Wasser auf, daß er beinahe kugelig wird. Auch gegen Kälte sind die Amphibien ziemlich empfindlich; im Winter graben sie sich ein. Im hohen Norden fehlen sie.

An Wasser sind die meisten Formen dadurch gebunden, daß die Begattung darin stattfindet und die Eier darin abgelegt werden. Doch haben viele Formen sich in verschiedener Weise — vgl. oben bei 4d) Abgekürzte Entwicklung und bei 4e) Brutpflege — davon frei gemacht. Sowohl ganz terrestrische Formen als vollständige Wasserbewohner kommen vor; typisch und primitiv ist aber ein gemischtes Leben.

Viele Amphibien, besonders Anuren, sind Baumbewohner, die meist mit Haftscheiben ausgestattet sind; einige von ihnen (Rhacophorus pardalis und reinwardti) sollen ihre sehr großen Schwimmhäute als Fallschirme benutzen können. Die Gymnophionen und verschiedene Anuren sind grabende Tiere; die Anuren graben mit den Hinterbeinen. Das Gift der Hautdrüsen bildet für viele Amphibien einen wirksamen Schutz gegen die meisten größeren Tiere.

Alle Amphibien sind Raubtiere, die sich von Würmern, Insekten, Schnecken, die größeren auch von kleinen Säugetieren, Fischen, Fröschen ernähren. Die meisten Anuren fangen Insekten mit ihrer umklappbaren, klebrigen Zunge und können daher nur auf dem Lande fressen.

Die Amphibien sind meist kleine Tiere, von einigen cm bis 20 cm lang; die Anuren werden selten größer (Rana goliath wird 28 cm); von den Urodelen erreichen nur einige Ichthyoden größere Länge, Megalobatrachus bis über $1\frac{1}{2}$ m.

Die Amphibien scheinen mehrere bis viele Jahre alt werden zu können, Megalobatrachus über 50 Jahre, sehr wahrscheinlich noch erheblich mehr. Die früher verbreitete Meinung, daß Kröten ein enormes Alter erreichen können, die sich auf das angebliche Auffinden dieser Tiere in geschlossenen Höhlen von Gesteinsmassen gründete, hat sich durch das Experiment als irrig erwiesen.

6. Systematik und Phylogenie. Die lebenden Amphibien werden in 3 Ordnungen eingeteilt, die schon äußerlich nach der Körpergestalt scharf getrennt und gut erkennbar sind; Urodela, Anura und Gymnophiona.

1. Ordnung Urodela. Salamander. Schwanzlurche mit gestrecktem Rumpfe, langem Schwanze und kurzen, nie ganz fehlenden, Gliedmaßen, wovon die hinteren nur wenig kräftiger sind als die vorderen. Der 5. Finger fehlt; 5 Zehen sind meist vorhanden. Die Befruchtung ist beinahe immer eine innere mittels Spermatophoren. Die Larven sind den erwachsenen Tieren ähnlich; sie besitzen äußere Kiemen.

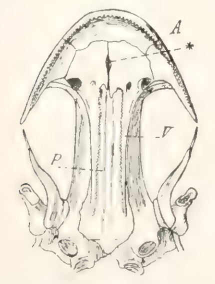
Die früher übliche Einteilung der Urodela in die 3 Unterordnungen der Perennibranchiaten, Derotremen und Salamandriden hat sich als irrig erwiesen, seitdem man die Angehörigen der beiden ersteren, die Ichthyoden, als neotenische Formen erkannt hat, die größtenteils unabhängig voneinander durch Ausfall (Perennibranchiaten) oder teilweise Rückbildung der Metamorphose (Derotremen) aus typischen Salamandern entstanden sind. Diese Tiere haben larvale Merkmale gemeinsam, die aber durchaus kein Zeichen einer näheren Verwandtschaft sind. Man muß sie bei den typischen Salamandern unterbringen, aus deren Verwandten sie durch Neotenie hervorgegangen sind; doch ist die Verwandtschaft bis jetzt nur für Typhlomolge eingehend geprüft worden.

Man teilt die Urodelen am besten direkt in einige Familien ein, wobei für jene neotenischen Formen, für die keine Beziehungen zu erwachsenen Formen nachgewiesen sind (die meisten), mehr oder weniger provisorische Familien errichtet werden müssen.

1. Familie Ambystomatidae. Vomeropalatinzähne in einer Querreihe (Fig. 7 B) oder in nach hinten konvergierenden Reihen in der Form eines V oder M; Parasphenoid zahnlos; Wirbel amphicöl. Ambystoma, 16 Arten in Nord- und Zentral-Amerika, eine in Siam. Die Larve von Ambystoma tigrinum

ist der bekannte Axolotl; Onychodactylus japonicus; die Larven mit Hautsaum an den Gliedmaßen; Salamandrella Sibirien; Batrachyperus (Ranodon) China; Hynobius (Ellipsoglossa) Japan. Die letzten 3 Gattungen sind vielleicht die primitivsten unter den Urodelen. Hierher gehören vermutlich die Derotremen Megalobatrachus maximus, der Riesensalamander aus Japan und China und Cryptobranchus alleghaniensis aus Nord-Amerika; beide zeigen im Schädel, Kiemenbogenskelett und dessen Muskulatur eine auffallende Aehnlichkeit mit Hynobius, Batrachyperus und Salamandrella (Wiedersheim; Drüner) und dürften daher neotenische Amblystomatiden sein.

2. Familie Salamandridae. Vomeropalatinzähne in 2, nach hinten etwas divergierenden Längsreihen, die beiderseits vom Parasphenoid weit nach hinten reichen (Fig. 23 A);



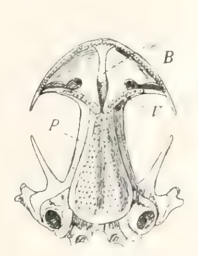


Fig. 23. Anordnung der Zähne am Munddach bei A Salamandridae (Schädel von Molge cristata) und B Plethodontidae (Schädel von Plethodon glutinosus (nach Wiedersheim Morph. Jahrb. Bd. 3 1877 Tab. 25 Fig. 111 und Tab. 23 Fig. 74). P Parasphenoid; V Vomeropalatin-Zähne; * Grube für die Glandula internasalis. Vergrößert.

keine Parasphenoidzähne; Wirbel opisthocöl. Salamandra maculosa, Feuersalamander, in Europa und Kleinasien; Salamandra atra, Alpensalamander. Salamandrina in Italien. Molge (Triton), Molche, meist Wassersalamander, oft mit Schwanzflossensaum; 18 Arten, davon Molge cristata, alpestris, vulgaris (taeniata) und palmata in Deutschland. Molge (Euproctes) rusconii in Sardinien. Molge (Pleurodeles) waltlii in Spanien und Portugal, 30 cm lang; die langen, spitzen Rippen durchbohren leicht die Haut; ebenso bei Tylototriton andersoni auf den Liukiu-Inseln; ob dies eine normale, nützliche Vorrichtung ist, ist fraglich. Molge torosus und viridescens in Nord-Amerika; einige Arten in Asien.

3. Familie Plethodontidae. Mit Parasphenoidzähnen; Vomeropalatinzähne in querer Reihe (Fig. 23 B). Wirbel amphicöl oder opisthocöl (Desmognathidae). Lungen immer rückgebildet. Die Familie ist typisch nordamerikanisch, nur eine Art, Spelerpes fuscus, der Höhlensalamander, kommt in Italien, den Seealpen, auf Sardinien vor; weitere Spelerpes-Arten in Amerika. Plethodon in Nord-Amerika; eine Art, Plethodon platensis in Argentinien. Plethodon cinereus kann springen und besitzt Autotomie des Schwanzes, der regeneriert; ebenso Autodax lugubris, der dazu einen Greifschwanz hat. Desmognathus. Typhlotriton spelaeus, der blinde Höhlensalamander aus der Rock House Cave in Missouri. Typhlomolge rathbuni, eine unterirdisch lebende, perennibranchiate Urodele aus Texas, ist sehr wahrscheinlich eine neotenische Spelerpes-Art (Emerson, Proc. Boston Soc. Nat. Hist. Bd. 32 1905).

4. Familie Amphiumidae. Mit einer Art, Amphiuma means in Nord-Amerika; neotenische Form, mit unvollständiger Verwandlung; ohne äußere Kiemen, mit einem Paare Kiemenspalten, mit Maxillare und Vomeropalatine. Sie hat diese Merkmale mit Megalobatrachus und Cryptobranchus, die ja auch in der Verwandlung stehen bleiben, gemeinsam, doch sind die Tiere sonst recht verschieden. Körper aalförmig, mit stummelförmigen, degenerierten Gliedmaßen, mit 1 bis 3 Fingern und 2 bis 3 Zehen.

5. Familie Sirenidae. Perennibranchiate, neotenische Formen; ohne Maxillare und Pterygoid; hintere Gliedmaßen fehlen. Nord-Amerika; 2 Arten: Siren lacertina, bis 70 cm lang, und Pseudobranchus striatus. Kiemen bei den Larven von einer Membran umhüllt; die jüngsten Larven sind unbekannt.

6. Familie Proteidae. Eine Art Proteus anguineus, der Olm, aus unterirdischen Gewässern in Dalmatien und Krain, blind. Von typisch larvalem Bau, mit äußeren Kiemen und 2 Paar Kiemenspalten. Gliedmaßen lang, zart, mit 3 Fingern und 2 Zehen.

7. Familie Necturidae. Mit einer Gattung Necturus (Menobranchus); wie der Olm eine typisch larvale Form und ihm daher in vielem ähnlich, ohne daß daraus auf Verwandtschaft beider Formen geschlossen werden darf. Mit kurzen, gut entwickelten Gliedmaßen und kleinen, aber funktionierenden Augen. 2 Arten in den östlichen Vereinigten Staaten von Nord-Amerika.

2. Ordnung Anura. Frösche. Kurzer schwanzloser Körper; die kräftigen, meist sehr langen hinteren Gliedmaßen mit einem von den verlängerten proximalen Tarsalia gebildeten 4. Segmente. Die Tiere schwimmen mit den Gliedmaßen und besitzen meist große Schwimmhäute. Wirbelsäule sehr stark verkürzt, mit nur 7 bis 9 Wirbeln und Steißbein. Die Eier werden bei der Ablage besamt. Die Larven sind die charakteristischen Kaulquappen. Es sind etwa 1200 Arten bekannt. Man teilt die Anuren in 2 Unterordnungen.

1. Unterordnung Aglossa. Ohne Zunge; eustachische Röhren mit unpaarer medianer Oeffnung am Munddach; ohne Augenlider; Wasserbewohner.

1. Familie Pipidae mit 3 Gattungen. Pipa americana in Brasilien und Surinam, mit sehr flachem Körper. Xenopus (Dacty-

lethra) in Afrika. Hymenochirus im tropischen Afrika.

2. Unterordnung Phaneroglossa. Mit Zunge; Mündung der eustachischen Röhren paarig. Die Einteilung entspricht vielleicht noch nicht immer der Verwandtschaft. Man teilt sie in 2 große Gruppen, je nachdem die Epicoracoide in der Mittellinie übereinander greifen (Arcifera) oder die Epicoracoide und Coracoide in der Mediane aneinander stoßen und dort fest verbunden sind (Firmisternia Fig. 2).

A. Arcifere Familien.

2. Familie Discoglossidae. Mit Rippen an den vorderen Wirbeln und verbreiterten Querfortsätzen am Sakralwirbel (Fig. 1 A). Wirbel opisthocöl. Die Zunge ist eine runde Scheibe und kann nicht ausgestülpt werden. Oberkiefer mit Zähnen. Kaulquappen mit medianem, brustständigem Spiraculum. Bombinator igneus, die rotbauchige Unke, in Zentral-Europa; Bombinator pachypus, die gelbbauchige Unke, in West-Europa. Alytes obstetricans, die Geburtshelferkröte, in West-Europa. Discoglossus pictus in Süd-Frankreich, Spanien.

3. Familie Pelobatidae. Ohne Rippen; Querfortsätze des Sakralwirbels verbreitert; Wirbel meist procöl; Zunge beinahe immer hinten frei und herausklappbar. Pelobates fuscus, die Knoblauchkröte, in Europa; am Hinterbein hinter der Wurzel der inneren Zehe liegt ein starker schaufelförmiger Fersenhöcker mit Hornkamm, der als Grabschwiele dient. Pelodytes punctatus in Frankreich, Spanien. Scaphiopus in Nord-Amerika.

4. Familie Bufonidae. Typisch ist das Fehlen von Zähnen in beiden Kiefern, beinahe immer auch am Vomer. Wirbel procöl; Querfortsätze des Sakralwirbels verbreitert. Zunge meist hinten frei, vorstreckbar. Die Tiere sind nicht immer so plump wie unsere Kröten. Bufo, die Kröten, mit über 80 Arten, beinahe kosmopolitisch. Bufo vulgaris, die graue Kröte, in Europa, im Süden bis 18 cm lang; Bufo viridis, die grüne Kröte; Bufo calamita, die Kreuzkröte. Pseudophryne in Australien und eine Art, Pseudophryne vivipara, in Deutsch-Ost-Afrika. Nectophryne in Afrika. Myobatrachus, in Australien, ist Ameisen- und Termitenfresser.

5. Familie Hylidae, Laubfrösche. Querfortsätze des Sakralwirbels verbreitert; Wirbel procöl; Oberkiefer mit Zähnen, sehr selten auch der Unterkiefer (Amphignathodon in Ecuador). Endphalangen krallenartig, mit Haftkissen, die mit einem klebrigen Stoffe bedeckt sind, und diesen beinahe immer baumbewohnenden Tieren als Haftorgane dienen. Zunge verschieden. Sie leben vorwiegend in feuchten Tropenwäldern. In Europa nur Hyla arborea; die übrigen etwa 180 Arten von Hyla meist in Amerika und Australien. Phyllomedusa im tropischen Amerika; Daumen und große Zehe opponierbar. Nototrema in Süd-Amerika. Triprion in Zentral-Amerika.

6. Familie Cystignathidae. Querfortsätze des Sakralwirbels nicht oder wenig verbreitert; Wirbel procöl, selten amphicöl; Zähne meist nur im Oberkiefer. Beinahe ausschließlich in tropisch Amerika und Australien Pseudis paradoxa in Süd-Amerika. Hylodes im tropischen Amerika. Calyptocephalus, Lepidobatrachus und Ceratophrys in Süd-Amerika. Chiroleptes in Australien. Ceratohyla, mit Haftscheiben, einem Laubfrosche sehr ähnlich, und Hemiphractus, beide in Süd-Amerika, haben Zähne im Unterkiefer. Dendrophryniscus in Süd-Amerika, ist zahnlos.

B. Firmisterne Familien.

7. Familie Engystomatidae, engmäulige Frösche. Querfortsätze des Sakralwirbels verbreitert; Wirbel procöl; Kiefer meist ohne Zähne, selten Zähne im Oberkiefer (Calluella in Indien und Dyscophus in Madagaskar). Procoracoid und Clavicula fehlen oft. Viele, nicht alle, Frösche dieser Familie haben eine enge Mundöffnung, über die der Kopf oft eine Art Schnauze bildet. Viele leben von Ameisen und Termiten und haben eine besonders enge Mundöffnung, wie Breviceps und Hemisus in Afrika. Die ziemlich vielen Gattungen und Arten leben meist in den Tropen. Rhinoderma darwini in Chile; Brachycephalus und Stereocyclops in Brasilien; Engystoma in Amerika; Callula in Indien.

8. Familie Ranidae. Querfortsätze des Sakralwirbels nicht verbreitert; Wirbel procöl; meist Zähne im Oberkiefer, seltener auch im Unterkiefer. Die Familie ist beinahe kosmopolitisch. Rana; in Deutschland Rana esculenta, der Wasserfrosch; Rana temporaria (Rana fusca), der Grasfrosch; Rana arvalis (Rana oxyrrhina), der Moorfrosch; Rhacophorus, in den Tropen der alten Welt, Baumbewohner mit Haftkissen; vertreten in ihrem Gebiete die Hylidae. Trichobatrachus, der Haarfrosch, in Französisch-Kongo, mit langen Papillen an den Körperseiten, die an Haare erinnern; Sooglossus auf den Seychellen; Phyllobates und Dendrobates in Süd-Amerika; Hylambates in Kamerun.

3. Ordnung Gymnophiona (Apoda, Coecilia) Blindwühlen. Wurmförmige, grabende Tiere, ohne Gliedmaßen. After am hinteren Körperende; ein Schwanz fehlt. Körper geringelt; die Ringel entsprechen bei den Larven den Körpersegmenten, doch wird dies durch Einschiebung neuer Ringel später geändert. Meist mit in der Haut verborgenen Schuppen. Am Kopf ein Tentakelapparat. Augen rückgebildet. Die ausstülpbare Kloake der Männchen dient als Begattungsorgan. Freie Larven wurmförmig, ohne äußere Kiemen, aber mit Kiemenloch mit 2 Spalten; oft fehlt ein freies Larvenstadium. Die Tiere ernähren sich meist von Würmern und leben in der Regel in feuchter Erde. Es sind über 20 Gattungen bekannt.

Nur 1 Familie Coeciliidae. Ichthyophis in Indien und auf den Sunda-Inseln.

Hypogeophis auf den Seychellen, in Afrika. Coecilia und Typhlonectes in Süd-Amerika. Siphonops in Afrika und Brasilien. Dermophis in Afrika.

Ueber die Phylogenie der lebenden Amphibien ist bei der Beschränktheit paläontologischen Materiales nichts Sicheres bekannt; man nimmt wohl mit Recht an, daß sie alle von Stegocephalen abstammen. Die Urodelen und auch die Anuren sind vielleicht an die Branchiosauriden anzuschließen. Die Urodelen sind im allgemeinen am wenigsten umgebildet, wenn sie auch den Hautpanzer verloren haben und die Lungenatmung in der Regel von der sehr gesteigerten Hautatmung und daneben von der Schlundatmung verdrängt worden ist. Die Lungen sind meist zu hydrostatischen Organen geworden. In diesen und anderen Umbildungen macht sich vielleicht der Einfluß einer größeren Bedeutung des Wasserlebens bei den Stammformen der Urodelen geltend; dies erklärt auch, weshalb diese Tiere es in der Umbildung zum Landtier nicht weiter gebracht haben, sondern auf primitiver, wenig differenzierter Stufe stehen geblieben sind. Die wahrscheinliche Rückbildung des schalleitenden Apparates muß vielleicht auch dem Einfluß des Wasserlebens zugeschrieben werden (Versluys Naturwiss. Wochenschr. Bd. 8 1909). Die Ichthyoden sind nicht die ältesten, sondern jüngere Urodelen, entstanden durch Neotenie; die permische Gattung Lysorophus, die bisweilen zu den Perennibranchiaten gerechnet wird, gehört nicht zu den Urodelen. Die Gymnophionen weichen erheblich von den übrigen lebenden Amphibien ab; dies und einige primitive Merkmale, wie die Schuppen, weisen auf einen selbständigen Ursprung von Stegocephalen hin.

7. Geographie. Die Verbreitung der Amphibien wird eingeschränkt durch ihre Empfindlichkeit gegen Trockenheit, Kälte, große Hitze und gegen Salzigkeit des Bodens; dazu kommt, daß sie für die Entwickelung der Jungen meist an Süßwasser gebunden sind. Dies macht sich besonders bei den Urodelen bemerkbar, die sich aus ihrer Heimat, dem holarktischen Gebiet (Nord-Amerika, Europa, Asien) nur sehr wenig weit südwärts verbreitet haben; in Süd-Asien leben nur 2 Arten, Tylototriton in Barma und eine Ambystoma in Siam, beide in Gebirgsgegenden. In der neuen Welt sind nur die Gattung Spelerpes mit 3 Arten in den Anden und Plethodon platensis in den Ebenen von Argentinien weit südlich vorgedrungen. Die Salamandridae sind größtenteils auf Europa beschränkt, mit nur wenigen Arten in Asien und Nord-Amerika. Dagegen sind für Amerika die Plethodontidae typisch, da nur eine Art außerhalb dieses Gebietes lebt, nämlich Spelerpes fuscus in Europa. Die Ambystomatidae sind zahlreich sowohl in Asien (5 Gattungen, 12 Arten) wie Nord-Amerika (2 Gattungen, 20 Arten). Die Ichthyoden haben, solange ihre Verwandtschaft mit den anderen Urodelen nicht festgestellt ist, für zoogeographische Betrachtungen keinen Wert. Die Gymnophionen sind zirkumtropisch; sie fehlen im nördlichen und südlichen Afrika und in Madagaskar, leben in Indien und auf den großen Sunda-Inseln, jedoch nicht auf Celebes; in Süd-Amerika fehlen sie im Süden und im Andengebiet, doch kommen sie in Zentral-Amerika vor. Die Anuren haben sich mehr als die anderen Amphibien verschiedenen Lebensbedingungen angepaßt und sind über die ganze Erde verbreitet, am zahlreichsten in den Tropen. Vielleicht hängt die mehr beschränkte Verbreitung der Urodelen auch damit zusammen, daß sie geologisch jünger sind als die Anuren.

Man kann folgende faunistischen Gebiete der Amphibien unterscheiden.

1. Ein holarktisches Gebiet, Nord-Amerika, Europa und Asien (ausgenommen Indien) und das nördliche Afrika umfassend. Hier leben die Urodelen und fehlen die Gymnophionen. Von Anuren sind die Discoglossiden auf dieses Gebiet beschränkt; es ist auch das Gebiet der Raniden, die allerdings von hier aus zahlreich in Indien und Süd-Amerika eingewandert sind, und der Pelobatiden, die sich nur noch nach Indien verbreitet haben. Cystignathiden und Engystomatiden fehlen; Hyliden sind von Süd-Amerika aus zahlreich nach Nord-Amerika, spärlich nach Asien und Europa (nur Hyla arborea) eingewandert. Auch die Bufoniden dürften in neuerer Zeit eingewandert sein, denn sie sind nur durch die eine, nahezu kosmopolitische Gattung Bufo vertreten. Ein vermutlicher Aglosse, Palaeobatrachus, lebte im europäischen Tertiär.

2. Ein paläotropisches Gebiet, Afrika (südlich vom Atlas), Ost-Indien und die Sunda-Inseln umfassend. Eigene Familien fehlen; am typischsten sind die Gymnophionen und Engystomatiden, in Afrika auch die Aglossen. Discoglossiden, Hyliden, Cystignathiden fehlen. Pelobatiden sind nur in Indien eingewandert. Raniden sind vom holarktischen Gebiete aus zahlreich vorgedrungen. Urodelen sind nur sehr spärlich in Nord-Indien eingewandert. Bufoniden sind zahlreich und wahrscheinlich schon lange heimisch.

3. Ein südamerikanisches Gebiet mit Gymnophionen, einer Aglosse (Pipa) und Engystomatiden, die es mit dem paläotropischen Gebiete gemein hat, Hyliden und Cystignathiden, die es vor allem mit Australien teilt. Pelobatiden und Discoglossiden fehlen; aus Nord-Amerika sind Raniden und einige Urodelen eingewandert. Bufoniden in Zentral-Amerika, sonst nur Bufo.

4. Ein australisches Gebiet. Typisch sind die vielen Cystignathiden und Hyliden,

wodurch dieses Gebiet dem südamerikanischen viel näher kommt als dem paläotropischen (Ost-Indien). Gymnophionen, Urodelen, Engystomatiden, Pelobatiden, Discoglossiden und Aglossen fehlen. Bufoniden sind vorhanden, aber die Gattung Bufo fehlt. Raniden sind nur in Nord-Queensland eingewandert (Rana papua). Papuasien bildet ein Mischgebiet der australischen und indischen (paläotropischen) Fauna. Neu-Seeland besitzt nur eine Amphibie, die Cystignathide Liopelma.

Diese Verbreitung der Amphibien weist auf das Bestehen von 3 Kontinentalmassen in früheren Zeiten (Ende des Mesozoicum) hin, jede mit einer typischen Fauna. 1. Der holarktische Kontinent mit Urodelen, Discoglossiden, Pelobatiden und Raniden; 2. ein Kontinent, der Brasilien, Zentral-Amerika, Afrika und Ost-Indien vereinigte, mit den Aglossen, Engystomatiden und den Gymnophionen, vielleicht auch den Bufoniden; 3. Australien, vereinigt mit dem südlichen Teil von Süd-Amerika, bewohnt von den Cystignathiden und Hyliden.

Literatur. ***G. A. Boulenger,*** *The Tailless Batrachians of Europe, Ray Society, London 1897, 1898.* — ***Derselbe,*** *Les Batraciens Encycl. Scient., Paris 1910.* — ***E. D. Cope,*** *The Batrachia of North America, Bulletin Un. States Nation. Museum, Nr. 34, 1889.* — ***B. Dürigen,*** *Deutschlands Amphibien und Reptilien, Magdeburg 1897.* — ***H. Gadow,*** *Amphibia and Reptiles, Cambridge Nat. History, Bd. 8, 1901.* — ***E. Gaupp,*** *Ecker-Wiedersheims Anatomie des Frosches, Braunschweig, 1897—1904.* — ***C. Gegenbaur,*** *Vergl. Anatomie der Wirbeltiere Leipzig, 1898—1901.* — ***F. Hempelmann,*** *Der Frosch, Leipzig 1908.* — ***O. Hertwig,*** *Handbuch d. Entwickelungslehre d. Wirbeltiere. Jena 1901—1906.* — ***C. K. Hoffmann,*** *Amphibien, Bronns Klassen und Ordnungen des Tierreichs, Leipzig-Heidelberg 1973 - 78.* — ***F. Leydig,*** *Ueber die Molche (Salamandrina) der württembergischen Fauna, Archiv f. Naturgesch., 1867.* — ***Derselbe,*** *Die Anuren Batrachier der deutschen Fauna, Bonn 1877.* — ***G. Tornier,*** *Amphibia, Süßwasserfauna Deutschlands, herausgegeben von A. Brauer, Jena 1909.* — ***R. Wiedersheim,*** *Vergl. Anatomie d. Wirbeltiere, 7. Aufl., Jena 1909.*

J. Versluys.

Amphibia.

Paläontologie.

1. Urodelen: a) Uebersicht über die fossilen Formen. b) Herkunft der Urodelen. c) Phyletisches System der Urodelen. 2. Anuren: a) Zeitliche Verbreitung fossiler Anuren. b) Arcifera c) Firmisternia. d) Beziehungen zu Urodelen und Stegocephalen. 3. Gymnophionen. 4. Paläogeographische Schlußbemerkungen.

Ueber die Vorgeschichte der Amphibien, welche hier in dem Umfang der Urodelen, Anuren und Gymnophionen aufgefaßt werden, gibt die Paläontologie nur äußerst unvollkommenen Aufschluß. Fossile Amphibien können wir nur in Süßwasser- und Landablagerungen erwarten. Solche sind besonders aus weiter zurückliegenden Zeiten nicht allzu reichlich fossilführend erhalten. Amphibienreste in ihnen sind Seltenheiten. Das überlieferte Material beschränkt sich auf Urodelen und Anuren.

1. Urodelen. 1a) Uebersicht über die fossilen Formen. Die ersten, Schwanzlurchcharaktere zeigenden Formen begegnen uns im unteren Perm von Illinois (Vermillion County), Texas (Craddock ranch, Coffee creek) und Oklahoma: der jetzt in erklecklicher Zahl von Individuen bekannte †Lysorophus tricarinatus Cope,[1]) unter welchem Namen nach den verschiedenen Darstellungen des Schädels bei Broili Case, Williston mehrere Arten zusammengefaßt sind. Die kleinwüchsigen, selten auf mehr als 15 cm Länge zu taxierenden Tierchen besitzen schlanke, an die der Eidechsen erinnernde, vorne verjüngte Schädelchen. Große, fast glatte, paarige Parietalia (ohne Parietalforamen), Frontalia, Nasalia und schlanke Praefrontalia (Lacrimalia Case, Broili) setzen das breit verknöcherte, in der Form sehr an Coecilien gemahnende, Schädeldach zusammen. Ein kleines „Supraoccipitale" (bei dem es unentschieden ist, ob es dem Supraoccipitale der Reptilien oder verschmolzenen Postparietalien der Stegocephalen entspricht) und „Epiotica" (= Tabularia Cope, = Squamosa Broili, Case) nehmen die Hinterregion ein. Das Hinterhauptsloch wird von den zwei Condyli bildenden Exoccipitalia umrahmt. Broili glaubt ein verknöchertes Basioccipitale mit einem dritten Condylus zu erkennen; weder Case noch Williston gestehen das zu. Die sehr große, weit nach vorne reichende Augenlücke wird hinten durch das Squamosum (= Teil des Squamosum Broili, Case) und das mit ihm durch Naht (?) verbundene, schräg nach unten und vorne ziehende Quadratum abgegrenzt; ihre vordere, untere Begrenzung bildet der niedrige Oberkiefer, hinten unten fehlt knöcherne Begrenzung. Die kleinen Nasenöffnungen liegen weit vorne, nahe der Schnauzenspitze. Die Schädelunterseite zeigt ein großes, breites, vorne spanförmiges Parasphenoid, in dem Case nach zwei Schädelchen Querteilung in (?) Basi- und Parasphenoid möglich hält (nach Broili Basioccipitale und Basisphenoid). Zwei Bogenreihen spitzer Zähnchen stehen wie bei den Coecilien auf Ober- und Zwischenkiefer und auf den Vomeres. Der Unterkiefer mißt kaum $^2/_3$ der Schädellänge. Broili glaubt auf der Schädelunterseite Jugularplatten zu sehen, die Williston

---

[1]) † vor dem Gattungs- oder Artnamen bedeutet fossile Gattung oder Art.

für verlagerte Bogenstücke des Atlas erklärt; letzterer konnte 4 Paare kräftiger, verknöcherter Kiemenbogen nachweisen. Die Wirbelsäule ist lang. In den unten und auf den Seiten kräftig gekielten, tief amphicölen Wirbelkörpern persistiert ein Chordakanal; dachfirstartig liegen die miteinander und mit dem Wirbelkörper nicht verwachsenen oberen Bogenhälften mit Prä- und Postzygapophysen und schlanker Diapophyse dem Körper auf. Die säbelförmig gebogenen, nach Case zum Teil zweiköpfigen Rippen sind bei der Kleinheit der Form auffallend lang, etwa gleich der Unterkieferlänge. Brust- und Beckengürtel sind unbekannt. Nach Williston (1908) besaß †Lysorophus sehr kleine Necturus-ähnliche (4 zehige ?) oder (1910) Amphiuma-ähnliche, also reduzierte, Extremitäten.

Die von Cope unter Vorbehalt zu den theromorphen Reptilien gestellte Gattung gewann in den Augen Broilis wegen der angeblichen Jugularplatten, um des Wirbelbaues und um der möglichen Fußlosigkeit willen (1904) besondere Bedeutung. Er sah in ihr einen den Cotylosauriern gleichwertigen Stammtypus der Reptilien „Paterosauridae", der die Rhynchocephalen (und damit Osborns Diapsida) direkt mit Fischen verbinden sollte. Die schon damals betonte Aehnlichkeit mit Lacertiliern hat Broili später (1908) unter Umdeutungen der Beobachtungen von Case so hoch bewertet, daß †Lysorophus zum „ältesten" Lacertilier wurde. Auch noch jüngst (1911) hält Broili an der Reptilnatur fest und führt †Lysorophus als Typ der besonderen Familie †Paterosauridae als Form von „unsicherer Stellung" im Anhang bei den Lacertiliern. Leitend für solche Auffassung ist Broilis Interpretation des Hinterhaupts — dreiteiliger Condylus — und manche Aehnlichkeiten namentlich der Schädelunterseite mit der rezenten Eidechse Amphisbaena. Der einzige Reptilcharakter im Schädel würde bei †Lysorophus das „Supraoccipitale" sein, vorausgesetzt, dieser Knochen entspräche einem echten Supraoccipitale. Für keinen Stamm der Reptilien kann Lysorophus die Bedeutung einer direkten Ahnform besitzen; das beweisen allein schon die reduzierten Extremitäten. Der Besitz von persistierenden, knöchernen Kiemenbogen schließt †Lysorophus endgültig von dem Bereich der Reptilien aus. Williston nennt ihn (1909) „the earliest known type of modern amphibias" und erhebt ihn zum Typ einer besonderen Familie †Lysorophidae, ohne deren Stellung gegenüber den heute lebenden Gruppen zu präzisieren.

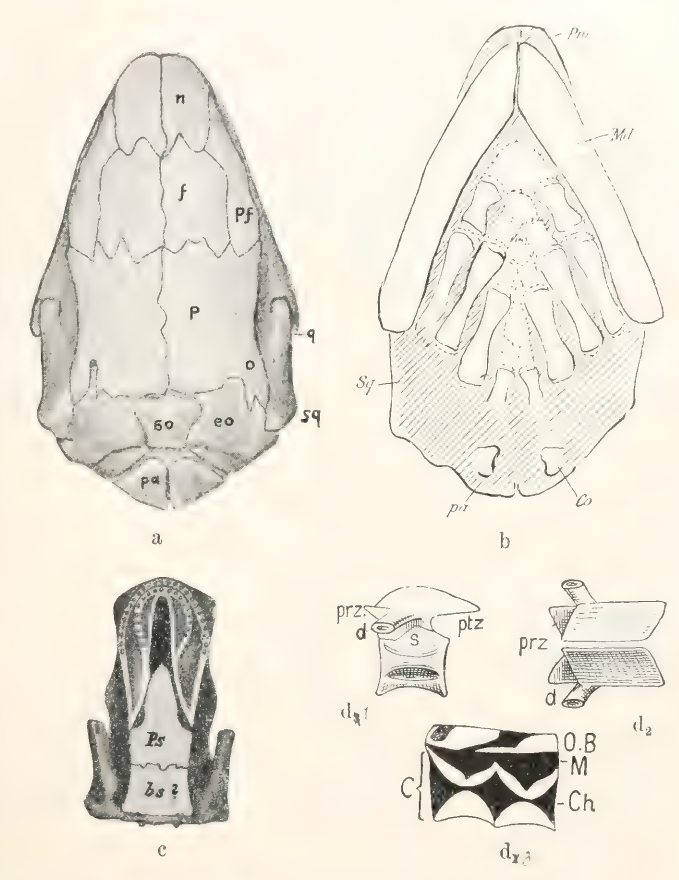


Fig. 1. †Lysorophus sp. (tricarinatus Cope). Unteres Perm, Texas. a Oberseite. b Unterseite des Schädels mit Kiemenbogen. 4mal vergrößert. Aus Jaekel nach Williston. c Unterseite des Schädels. Nach Case. 2mal vergrößert. d Wirbel, d_1 von links, d_2 von oben, d_3 Längsschnitt vergrößert. Nach Broili. C Wirbelzentrum. Ch Chordaraum, d Diapophyse, eo „Epioticum", Tabulare, f Frontale, M Rückenmarkkanal, Md Unterkiefer, n Nasale, OB Oberer Bogen, p Parietale, pa co Atlas, pf Präfrontale, Pm Prämaxille, Ps (und bs?) Parasphenoid, prz ptz Prä- und Postzygapophyse, q Quadratum, s Naht zwischen Wirbelkörper und oberem Bogen, so „Supraoccipitale?", sq Squamosum.

Nach sehr langem Intervall, erst in der

untersten Kreide, im Wealden von Bernissaert in Belgien, begegnet uns der nächstjüngere Vertreter der Urodelen: †Hylaeobatrachus Croyi Dollo. Ein einziges Individuum, ein Schatz des Brüsseler Museums. Eine tritonähnliche Form von kaum 9 cm Länge. Der Schädel ist schlank, vorne auffallend zugespitzt, mit verknöchertem Oberkiefer, dessen Bezahnung undeutlich erhalten ist. Drei Paare verknöcherter Kiemenbogen sind erhalten. Die ziehungen zu lebenden Gattungen nicht immer eindeutig sind.

Aus den obereocänen und oligocänen Phosphoriten Frankreichs liegen Skeletteile vor, unter denen die großwüchsigen Wirbel des †Megalotriton Filholi Zitt., abgesehen von ihrer Opisthocoelie, in ihrer ganzen Form, besonders auch durch die Gestalt der Querfortsätze lebhaft an den nordamerikanischen (Proteiden) Necturus gemahnen. Aber Oberarm und Oberschenkel

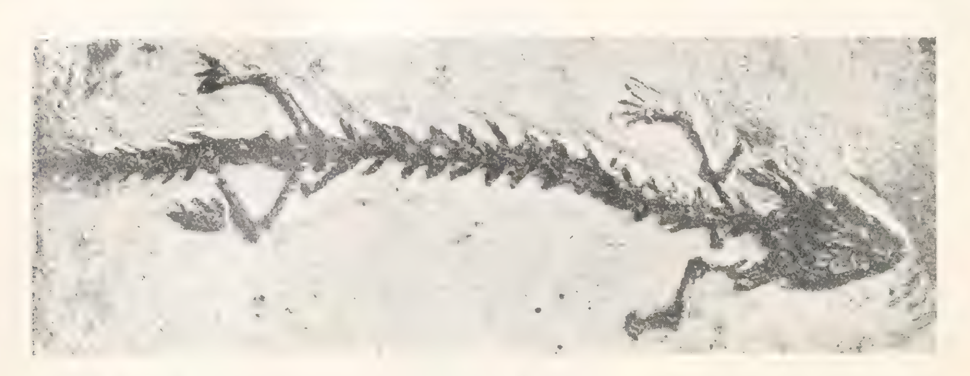


Fig. 2. †Hylaeobatrachus Croyi L. Dollo. Wealden, Untere Kreide, von Bernissaert, Belgien. Skelett von der Bauchseite. Nach Dollo. $^3/_2$ natürliche Größe.

Wirbel tragen an den Querfortsätzen ganz kurze Rippen. 15 (?) präsakrale und wenigstens 15 Schwanzwirbel besaß die Form. Schulter- und Beckengürtel sind undeutlich, das Schulterblatt ist stabförmig (?). Die Extremitäten sind kräftig, fast auffällig groß, mit vorne 4 und an dem etwas größeren Fuß 5 Zehen. Zweifelsohne eine Urodelenform. Sie ist ausgewachsen und zeigt „perennibranchiaten" Typus, aber keine Proteide oder Sirenide, doch ebensowenig unmittelbar mit den Salamandriden zu vereinigen: Ein selbständiger Typ — †Hylaeobatrachidae n. fam.

Abermals nach erheblicher Pause, in der oberen Kreide, jetzt wieder in Nordamerika, in den Judithriver beds von Montana und Bellyriver beds von Assiniboia (Kanada) treffen wir Urodelen. Cope und Lambe beschrieben sie: isolierte, tief amphicoele Wirbel, der Atlas mit großen Gelenkflächen, einzelne Wirbel mit abnorm hohen Dornfortsätzen, ganz vereinzelte Skelett- und Kieferreste — †Scapherpeton Cope, ein isolierter anders gestalteter Wirbel — †Hemitrypus Cope. Mit den Ambystomatinen, also mit Salamandriden verglich Cope diese Reste.

Etwas reichlicher fließen die Urkunden aus dem Tertiär, nun aus Europa. Ganz vorwiegend sind es jetzt Formen echter Salamandridae, wenn auch die Be- sind viel größer und außerdem noch durch starke Protuberanzen unter den proximalen Gelenkenden verschieden. Verwandte Reste kommen wohl auch im Unter-Miocän des Mainzer Beckens vor.

Mehrfach wurden Salamandriden aus den oberoligocänen und miocänen Süßwasserablagerungen Böhmens (Braunkohlen, Diatomeenschiefer, Tuffe von Markersdorf, Alt-Warnsdorf, Luschitz, Sulloditz), des Siebengebirges (Rott, Orsdorf bei Erpel) und aus dem Miocän Fnkreichs (Sansan, St. Gérard le Puy, Puy de Dôme) besonders von Hermann v. Meyer und von Laube beschrieben, darunter auch Vertreter der lebenden Gattungen Salamandra und Triton. Einzelne Typen besitzen bemerkenswerte Eigentümlichkeiten. Bei dem schlankköpfigen †Heliarchon furcillatus H. v. M. aus der Braunkohle von Rott fallen lange, leicht gebogene Rippen (mit seitlichen Fortsätzen) auf, die dem Rumpf langovale Form geben. Auch †Polysemia ogygia Goldf. sp. von Orsberg bei Erpel mit 3 Paaren von Oeffnungen im Schädel hat auffallend lange Rippen. †Archaeotriton (Archaeotriton basalticus H. v. M. aus dem Tuff von Alt-Warnsdorf, Archaeotriton Menzeli Lb. aus dem Diatomeenschiefer von Sulloditz) und wohl auch Triton †opalinus H. v. M. aus Sulloditz haben auffallend hohe Dornfortsätze. †Archaeotriton Menzeli, basal-

ticus und Triton †noachicus haben deutlich opisthocöle Wirbel, und †Archaeotriton Menzeli besitzt zweiköpfige Gabelrippen.

Zur größten Berühmtheit gelangte ein fossiler Vertreter des Derotremen-typus: †Andrias Scheuchzeri Tschudi aus dem obermiocänen Süßwassermergel von Oeningen, Baden, das erste beschriebene fossile Amphibium überhaupt, dessen Skelett der Mediziner und Mathematiker Johann Jakob Scheuchzer 1726 als „homo diluvii testis", als „betrübtes Beingerüst von einem alten Sünder" ansprach, der Zeuge der Sintflut gewesen sei — für einen Arzt selbst des 18. Jahrhunderts eine bemerkenswerte Leistung. Als Fisch, als Eidechse wurde das Fossil gedeutet, bis G. Cuvier es als Amphibium erkannte. Die bis 1,2 m Länge erreichenden, meist unvollständigen Skelette, mit deren einem eine Larve mit geringer Skelettverknöcherung gefunden wurde (in den Museen von Karlsruhe, Konstanz, Zürich, Leyden, London), stimmen fast vollständig mit denen des japanischen Riesensalamanders und des nordamerikanischen Hellbenders überein; die Hyoide sind außerordentlich stark. Nach der breiteren Schädelform wäre †Andrias Scheuchzeri dem Cryptobranchus alleghaniensis Harl. näher als dem Megalobatrachus japonicus v. d. Hoev. Da über das Vorhandensein oder Fehlen eines Kiemenloches nicht zu entscheiden ist, kann einer direkten Vereinigung des †Andrias weder mit Cryptobranchus noch mit Megalobatrachus das Wort geredet werden. Eine kleinere Form, †Andrias Tschudii, nur von halber Größe des †Andrias Scheuchzeri beschrieb H. v. Meyer aus der untermiocänen Braunkohle von Rott. Und kürzlich untersuchte G. C. Laube ein Wirbelsäulenfragment (aus dem Ober-Oligocän von Pretschen bei Bilin) einer großwüchsigen Form: †Andrias bohemicus, die er den Vorläufer der Oeninger Art nannte.

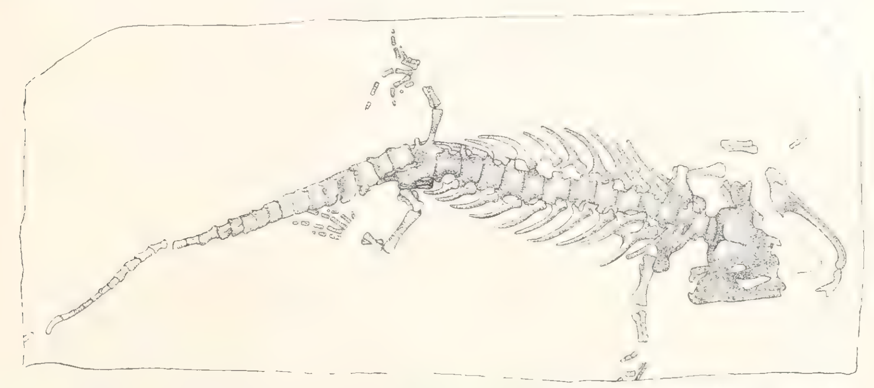


Fig. 3. †Heliarchon furcillatus H. v. M. Unter-Miocän, Braunkohle, Rott am Siebengebirge. Nach Hermann v. Meyer.

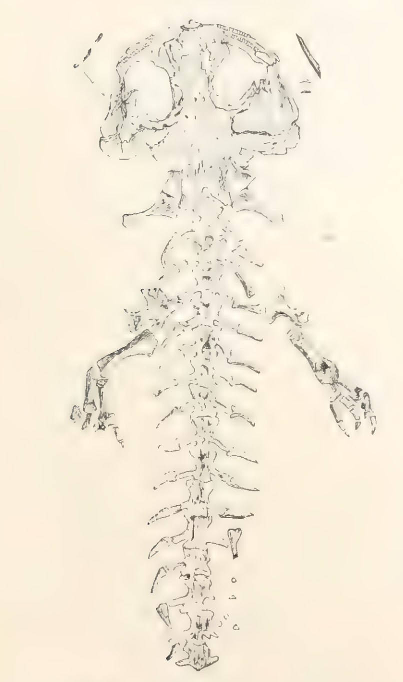


Fig. 4. †Andrias Scheuchzeri Tschudi. Ober-Miocän von Oeningen, Baden. Scheuchzers Original, Bauchseite nach Cuviers Bearbeitung. Aus Zittel. $^1/_6$ natürliche Größe.

Als †Orthophya longa und solida beschrieb H. v. Meyer aus dem Ober-Miocän Oeningens Reste von sehr langgestreckten, vielleicht fußlosen Formen mit amphicölen Wirbeln und schlanken, spitzigen Schädeln. Nach v. Zittel wären das viel-

leicht perennibranchiate Urodelen, doch die Deutung ist ganz unsicher.

Aus diluvialer Zeit scheinen nur äußerst spärliche Reste von Salamandriden erhalten zu sein.

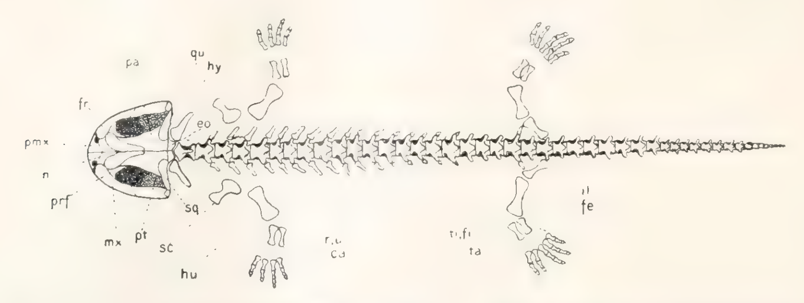


Fig. 5. † Andrias Scheuchzeri Tschudi. Stark verkleinerte Restauration nach Moodie.
ca Carpus, eo Exoccipitale, fe Femur, fr Frontale, hu Humerus, hy Hyoid, il Ileum, mx Maxillare, n Nasale, pa Parietale, pmx Praemaxillare, prf Praefrontale, pt Pterygoid, qu Quadratum, r, u Radius-Ulna, sc Scapula, sq Squamosum, ta Tarsus, ti, fi Tibia-Fibula.

1b) Herkunft der Urodelen. Uebereinstimmend bezeichnen Credner, Moodie, Thevenin, Versluys u. a. die Urodelen, die primitivsten der heute lebenden Vierfüßler, als Nachkommen der phyllospondylen †Branchiosaurier unter den Stegocephalen aus dem oberen Karbon und unteren Perm Europas und der Vereinigten Staaten. Und zumeist werden die rezenten Amphibien mit den Branchiosauriern und den übrigen †Stegocephalen unter dem Begriff Amphibien vereinigt.

Unter den fossilen Vierfüßlern gibt es allerdings keine Gruppe, welche größere Aehnlichkeit mit den Urodelen zeigte, als eben die Branchiosaurier. Die allgemeine Körperform bei meist geringer Größe ist die gleiche. Die Ausbildung der Extremitäten ohne verknöcherte Epiphysen, mit normal 4 Fingern und 5 Zehen, stimmt, mit Ausnahme der Phalangenformel, überein. Die bei den Phyllospondylen tonnenförmigen Wirbel mit weitem Chordakanal mit nicht verwachsenen oberen Bogen, mit kräftigen Querfortsätzen sind den primitiv amphicölen Urodelenwirbeln ähnlich. Die Rippen der meisten Urodelen sind wie die der Branchiosaurier kurz, gerade, schwach. Den Branchiosaurierlarven kam Kiemenatmung zu. Moodie glaubt bei dem karbonischen Branchiosaurier †Micrerpeton ein Seitenliniensystem zu sehen gleich dem der Larve von Necturus. Also eine Fülle enger Beziehungen zwischen Branchiosauriern und Urodelen.

Zum Werden eines Urodelen aus einem Branchiosaurier bleibt aber eine Menge von Umprägungen notwendig: der Verlust des aus knöchernen Schuppen bestehenden Bauchpanzers der erwachsenen Branchiosaurier, weitgehende Reduktion der Schädelpanzerung durch Verlust der postparietalen Deckknochen, der die hintere untere Umrahmung der Orbita bildenden Platten, des Supratemporale, des Quadratojugale und Jugale, Verlust der Sklerotikalplatten (dadurch erhebliche Vergrößerung der Augen-Schläfenhöhle), Verlust des Parietalforamens, Umgestaltung und weitgehende Reduktion des Schultergürtels. Dann ist nötig: Verbreiterung des Parasphenoids, stärkere Verknöcherung der Wirbel, der Rippen, die normal zweiköpfig werden. Solche Umprägungen müßten z. T. recht schnell vor sich gegangen sein, da schon bei dem unterpermischen, also den meisten Branchiosauriern gleichaltrigen †Lysorophus die Reduktion der Deckknochen in der Orbital- und Postparietalregion (mit Ausnahme der „Epiotica"-Tabularia) und die Verbreiterung des Parasphenoids vollzogen ist. Außerdem hätten die Umprägungen von Branchiosauriern zu jüngeren Urodelen sich nicht in einfach gradlinigem Vorschreiten abgespielt, wie das postparietale „Supraoccipitale" bei †Lysorophus beweist: eine Umwandlungsreihe 1) 2 postparietale Deckknochen bei Branchiosauriern, 2) Verschmelzung zu einem Supraoccipitale bei †Lysorophus, 3) postparietaler Knorpel bei jüngeren Urodelen, böte ebenso viel Unwahrscheinliches, wie das nur zeitweilige Auftreten eines echten Supraoccipitale allein bei †Lysorophus. Die Umwandlung der Branchiosaurierblattwirbel in die der Urodelen ist nach Gadows Interpretationen denkbar; die Wirbelkörper von †Lysorophus ähneln aber mehr denen der lepospondylen †Mikrosaurier. Das übereinstimmend genannte Merkmal der kurzen, geraden Rippen (Moodie) besitzt nur sehr eingeschränkten Wert, da ja bei †Lysorophus im Perm und †Heliarchon, wie Salamandra laticeps H. v. M.,

†Polysemia im Tertiär lange, gebogene Rippen ausgebildet sind. Das erinnert eher an Mikrosaurier unter den Stegocephalen, nicht an Branchiosaurier. Als Neuerwerbung haben tertiäre Salamandriden zudem auch Gabelrippen, bei denen man von Processus uncinati sprechen könnte. Noch sei hervorgehoben, daß die Entwickelungsrichtung der Branchiosaurier durch Erwerbung des Bauchpanzers in nachlarvalen Stadien eine andere ist wie bei den Urodelen. Dort viel intensivere Anpassung an kriechendes Leben auf dem Lande. Bei den des Bauchpanzers entbehrenden Urodelen muß angenommen werden, daß für die Vorfahren der heute erwachsen auch als Landbewohner existierenden Formen das Leben im Wasser längere Zeit eine größere Rolle spielte als für die Branchiosaurier (vgl. z. B. Versluys). Diese durch Beobachtungen über Erscheinungen der Neotenie bei lebenden Urodelen gewonnene Anschauung findet im fossilen Material wertvolle Stütze: †Lysorophus im Perm, †Hylaeobatrachus in der unteren Kreide haben erwachsen 4 oder 3 Paare verknöcherter Kiemenbogen, beiden eignete also Kiemenatmung noch in erwachsenen Stadien.

Die Abstammung der Urodelen von den Branchiosauriern muß als möglich bezeichnet werden, einwandfreie Beweise gibt es für sie nicht. Beide Gruppen sind wohl eher durch — bis jetzt unbekannte — Stammesgleichheit verwandt. Die Branchiosaurier mit den Urodelen zusammenzuschweißen und von den übrigen Stegocephalen ganz zu trennen, wie das besonders Moodie befürwortet, geht nicht wohl an.

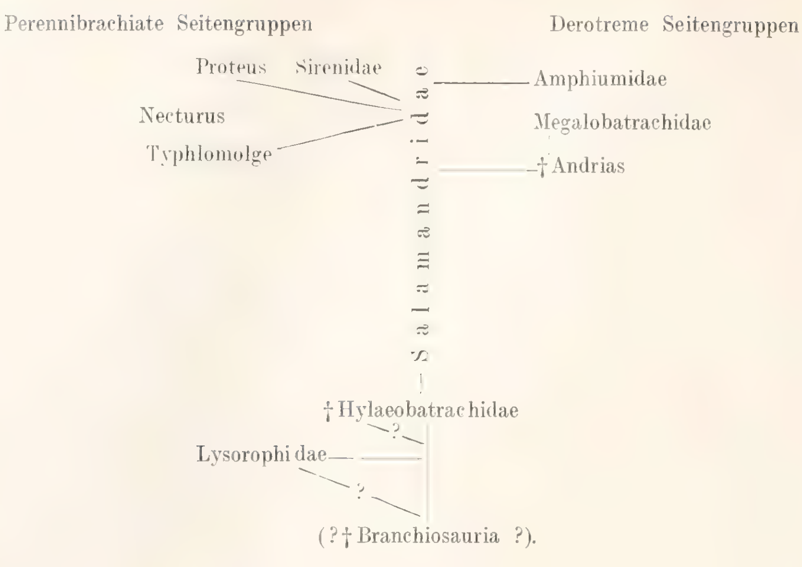
1c) Phyletisches System der Urodelen. Das fossile Urodelenmaterial könnte nach †Lysorophus und †Hylaeobatrachus so ausgelegt werden, daß der Perennibranchiaten- oder Ichthyoidtypus der Vorläufer der übrigen Urodelen, speziell der Salamandriden (und Amphiumiden) sei. †Lysorophus wäre dann ein nur in bezug auf die Extremitäten reduzierter Perennibranchiat, (?) Proteide, und †Hylaeobatrachus würde ein nicht einmal bezüglich der Extremitäten reduzierter Perennibranchiat sein. Die Untersuchungen von Cope, den Sarrasins, Boas, Simroth, E. T. Emerson u. a. über Neotenie bei den Urodelen ergaben, daß „perennibranchiat", „ichthyoid" physiologische Charaktere sind, die — mehrfach und unabhängig erworben — keine Bedeutung zur Unterscheidung natürlicher Gruppen (Unterordnungen oder Familien) besitzen können. Unter diesem Gesichtswinkel sagen die fossilen Urodelen, daß †Lysorophus, †Hylaeobatrachus zwar perennibranchiate Charaktere zeigen, daß sie aber mit den rezenten Perennibranchiaten in keinerlei direktem genetischem Zusammenhang stehen können. Ein Weg: †Lysorophus mit reduzierten Extremitäten, †Hylaeobatrachus mit normalen, Proteidae und Sirenidae wieder mit reduzierten Füßen (und Oberkiefern), ist undenkbar.

Lysorophus mit seiner besonderen Schädel- und Wirbelkonstruktion bedeutet einen von den übrigen Urodelen seitab stehenden Zweig. †Hylaeobatrachus ist, so wenig über die Osteologie des Schädels bekannt ist, am besten als ein mit persistierenden Kiemen versehener Salamandridenverwandter zu deuten. Er bedeutet entweder eine zu perennibranchiater Organisation gerichtete Abzweigung des Urodelentyps oder eine jener theoretisch geforderten Salamandridenahnformen, die durch Neotenie gegenüber ihrer Ahnengruppe (? Branchiosaurier) länger oder dauernd an das Wasserleben angepaßt blieb, auch länger wie ihre Nachkommen, die in den tertiären und quartären Salamandriden dem Leben auf dem Lande zurückgewonnen wurden. Von beiden Möglichkeiten hat die zweite um der nicht verkümmerten Extremitäten des †Hylaeobatrachus willen die größere Wahrscheinlichkeit für sich. Das paläontologische Material ergibt in gutem Einklang mit dem lebenden als eigentlichen Träger des Urodelencharakters den Typus der Salamandriden, dessen weitere Gliederung vorläufig paläontologisch kaum durchführbar ist. Von ihm zweigen unabhängig perennibranchiat und derotrem werdende Ichthyoidtypen ab. Als Stammesbild hat das auf der folgenden Seite entworfene zu gelten; dort sind unter Salamandridae Ambystomatinae, Salamandrinae und Plethodontinae zusammengefaßt.

2. Anuren. 2a) Zeitliche Verbreitung fossiler Anuren. Wie die Zahl der lebenden Kröten und Frösche wesentlich größer ist als die der Schwanzlurche, so sind auch fossile Anuren in wenigstens etwas größerer Anzahl bekannt. Verhältnismäßig oft wurden ganze Skelette gefunden und — in den tertiären Braunkohlen von Rott, Orsberg im Siebengebirge und von Kaltennordheim in der Rhön — eine größere Zahl von Larven in verschiedenen Entwickelungsstadien der Gattungen †Palaeobatrachus und Rana.

Alle fossilen Formen sind Phaneroglossa.

Die ältesten Reste von Froschlurchen — Kröten — entstammen dem oberen Jura. L. M. Vidal beschrieb aus einem lithographischen Schiefer des Kimeridge von Montsech in der spanischen Provinz Lerida als †Palaeobatrachus Gaudryi



Vid. den Abdruck eines vollständigen Skelettes, an dem nur die Hände fehlen. Die ziemlich schlanke Form — Kopf-Beckenlänge 34 mm, Kopfbreite 9 mm, Schädel länger als Wirbelsäule ohne Coccyx — zeigt vollkommen typisches Anurengepräge. Bestimmende osteologische Details sind nicht erkennbar, so daß die Zurechnung zur tertiären Gattung †Palaeobatrachus Tschudi und Vidals Hinweis auf Aehnlichkeiten mit Bombinator allein aus dem allgemeinen Krötenhabitus gewonnen sind. Eine zweite Art aus dem Jura — von Wyoming, Nord-Amerika — nannte O. C. Marsh †Eobatrachus agilis n. g. n. sp.; sie zu beurteilen ist nicht möglich, da sie weder beschrieben noch abgebildet wurde. Das einzige, was Marsh von ihr sagte, ist, sie sei kleinwüchsig.

Aus der Kreidezeit sind keine Anuren erhalten.

Im Tertiär, besonders Mitteleuropas, kommen Froschlurche an einer größeren Zahl von Fundorten vor, zumeist sind es dieselben, welche auch Urodelen lieferten. In den obereocänen und oligocänen Phosphoriten des Quercy—Departement Lot, Südfrankreich — in den oligocänen und miocänen Braunkohlen- und Süßwasserablagerungen Nordböhmens, der Rhön (Kaltennordheim, Sieblos), der Wetterau, im Mainzer Becken (Hochheim, Weisenau), von Rott und Orsberg am Rhein, von Oeningen, der Schwäbischen Alb, bei Günzburg in Bayern, der Auvergne, Provence und Ober-Italiens wurde eine ganze Menge teils ausgestorbenen, vielfach aber noch lebenden Gattungen angehörender Formen gefunden, und zwar sowohl Arciferen wie Firmisternien. Außerhalb Europas ist nur aus dem Eocän Ost-Indiens, von Bombay, ein Ranide bekannt, und aus dem Eocän von Wyoming hat Cope unbenannte Anurenreste erwähnt.

Die in diluvialen Höhlenablagerungen und im Löß, namentlich Mitteleuropas, seltener in Süd- und Nordamerika, gefundenen Reste entstammen durchweg lebenden Gattungen und auch wohl Arten.

2b) Arcifera. Wenn die Bestimmung des Anuren aus dem Jura Spaniens als †Palaeobatrachus richtig ist, dann ergäbe sie das auch sonst Wahrscheinliche,



Fig. 6. †Palaeobatrachus grandipes Gieb. Unter-Miocän, Braunkohle, Orsberg, Siebengebirge. $^2/_3$ natürliche Größe. Nach Wolterstorff aus Zittel.

durch die Ontogenie der Firmisternia geforderte Resultat, daß der Stamm der Arciferen der ältere der Phaneroglossen sei. Die sonst aus dem Tertiär, Unter-Oligocän bis Mittel-Miocän, in 15 Arten mit mehreren Varietäten

nachgewiesene Gattung †Palaeobatrachus Tschudi mit meist ziemlich kleinwüchsigen Formen, deren Schädel länger ist als die Wirbelsäule ohne Coccyx, kann aber nicht der wirklich älteste, ursprünglichste Arciferentypus sein. Das zeigen die Verwachsungen der Wirbel (1.+2. und 7.+8.+9.) und der Querfortsätze (am 8. und 9., bei †Palaeobatrachus Fritschi am 7., 8. und 9. Wirbel), sowie das Fehlen von Rippen und die Verschmelzung der Frontoparietalia zu einer Platte, die bereits bei vorgeschritteneren Larven eintritt. Zweifelsohne primitivere Merkmale — Rippen, zwei Querfortsätze am Coccyx — besitzen die Discoglossiden, nach Gadow die altertümlichsten Kröten überhaupt. Fossil sind diese allerdings erst seit dem Oberoligocän bekannt: †Protopelobates gracilis Bieb. von Sulloditz in Böhmen, eine an Bombinator erinnernde Form. Vereinzelte Reste von Discoglossus selbst sind bei Hochheim und Weisenau im Mainzer Becken gefunden. Alytes (Alytes †Troscheli H. v. M.) ist aus der untermiocänen Braunkohle von Rott bekannt, und †Pelophilus Agassizi Tchudi, wieder Bombinator nahestehend, wurde im Ober-Miocän von Oeningen gefunden. Den Discoglossiden wird auch die gewaltige †Latonia Seyfriedi H. v. M. aus dem Oeninger Ober-Miocän zugezählt: Eine ausgestorbene Riesenkröte — Lavater hielt sie für einen Vogel — von etwa 19 cm Kopf-Beckenlänge, mit rippenlosen, procölen Wirbeln und breitem Querfortsatz am Sakralwirbel; der kurze, stumpfe Schädel zeigt verwachsene Stirnscheitelbeine, kleine Augenhöhlen, Hautverknöcherungen kommen an ihm vor.

Die nach Gadow von den Discoglossiden zu den auch fossil gefundenen Cystignathiden (Ceratophrys und Leptodactylus im Diluvium von Lagroa Santa, Brasilien) hinüberleitenden Pelobatiden sind aus der untermiocänen Braunkohle von Rott (Pelobates †Decheni Trosch.), aus dem Mainzer Tertiär und aus dem Diluvium von Thiede in Braunschweig bekannt. Bufoniden, nach Gadow auch aus Pelobatiden hervorgegangen, sind fossil weiter zurückzuverfolgen als letztere, bis ins Alttertiär: Bufo †serratus Filh. in den Phosphoriten des Quercy, von wo Filhol wohlerhaltene Mumien dieser Kröte beschrieb.

Mit Ausnahme der (aus den Cystignathiden hervorgegangenen?) Hylidae sind also Vertreter aller Hauptfamilien der Arciferen fossil bekannt, aber in einer zeitlichen Aufeinanderfolge, welche kein Abbild der auf die Organisation gegründeten phyletischen Verhältnisse gibt.

Den †Palaeobatrachiden, welchen die Bedeutung einer Wurzel der Arciferen nicht zukommen kann, wird in anderer Richtung viel Gewicht beigemessen. Während Boulenger nächste Beziehungen zwischen †Palaeobatrachus und manchen, nach der Zahl und Bildung der Wirbel altertümlich zu nennenden Pelobatiden, besonders der Gattung Batrachopsis aus Neu-Guinea sah, betonte Woltersdorff, daß Palaeobatrachus durch den Bau der Sakralregion, des Schultergürtels, durch die verwachsenen Stirnscheitelbeine, die Form der Pterygoide und durch die Hinterhauptsregion auch Anklänge an Xenopus (Dactylethra) zeige; †Palaeobatrachus sei vielleicht ein „Kollektivtyp", der zu den Pelobatiden wie auch zu den Aglossa hinüberleite. Gadow stellt †Palaeobatrachus direkt mit den jetzt in tropischen und südlich-subtropischen Gebieten lebenden Gattungen Xenopus (Dactylethra), Pipa und Hymenochirus zu den Aglossa. Dann wären die Aglossa, wie schon mehrfach angenommen, die ältesten der Anuren? Die lebenden Formen sind unter anderem durch Reduktion der Wirbelzahl, durch die Verwachsung von Sakrum mit Coccyx, Verwachsung der Frontoparietalia, durch den zum firmisternen Typ hinüberführenden Bau des Schultergürtels und durch die vollkommene Anpassung an das Wasserleben besonders spezialisiert; durch den Besitz von mindestens in der Jugend freien Rippen sind sie altertümlich. Nach dem Bau der Wirbelsäule könnte man an engere Beziehungen von †Palaeobatrachus zu Pipa oder Hymenochirus denken, bei denen das Sakrum durch den 8. und 9. oder 6. und 7. Wirbel gebildet wird, nicht aber zu Xenopus mit nur einem — und zwar dem 9. — Sakralwirbel. Der Besitz von Rippen bei den Aglossa schließt es aus, daß †Palaeobatrachus ihr Ahn sein könne. Ebensowenig ist direkte Verbindung zwischen †Palaeobatrachus und den Pelobatiden beweisbar. †Palaeobatrachus ist ein frühzeitig nach der Richtung der Aglossa spezialisierter Zweig der Anuren, der am besten bei den Phaneroglossa arcifera belassen wird.

2c) Firmisternia. Außer mehreren unvollständig erhaltenen und in bezug auf ihre Stellung noch nicht genügend zu fixierenden Formen aus dem Oligocän und Miocän Frankreichs und Italiens sind Frösche, und zwar Ranidae, seit dem Alttertiär bekannt. Im Eocän Ostindiens, bei Bombay, wurden sehr zahlreiche Skelette des kleinen, zierlichen Oxyglossus †pusillus Ow. sp. gefunden, des ältesten Angehörigen einer heute in Hinterindien und auf den Philippinen lebenden Gattung. Fossile Arten der Gattung Rana kennt man ebenfalls seit dem Alttertiär: Rana †plicata Filh. in den Phosphoriten des Quercy, z. T. in „Mumien" erhalten. An den meisten der oligocänen und miocänen Fundplätze von Anuren, sind Rana-Arten nachgewiesen. Eine nach den Beobachtungen von Wolterstorff und Eberhard Fraas festzustellende Formenreihe verdient Beachtung: Rana †Meriani H. v. M.,

Unter-Miocän von Rott. — Rana †Danubina H. v. M., Ober-Miocän von Günzburg, — Rana Danubina var. †rara O. Fraas, Ober-Miocän von Steinheim, — Rana esculenta L., Quartär. Rana nahestehend, aber durch die geringe Entfaltung des Condylus am Oberarm niedriger organisiert ist †Asphaerion Reussi H. v. M. aus der Braunkohle von Luschitz in Böhmen.

Für die Festlegung verwandtschaftlicher Beziehungen zwischen Kröten und Fröschen liefert das fossile Material keine Hilfe, stehen doch — wenn wir von dem jurassischen †Palaeobatrachus Gaudryi absehen — Arcifera und Firmisternia seit dem Alttertiär getrennt nebeneinander. Solche Feststellung hindert nicht, die Firmisternien als den jugendlicheren Anurenzweig anzusehen, dessen Trennung von den Arciferen sicher schon früher, lange vor tertiärer Zeit, vollzogen sein muß.

2d) Beziehungen zu Urodelen und Stegocephalen. Die Anuren sind ein seit weit zurückliegender Zeit vollkommen gefestigter Ast des Amphibienstammes, der seit seinem ersten bekannt gewordenen Auftreten im oberen Jura trotz der Anpassung an recht verschiedene Lebensgewohnheiten keine wesentlichen Umprägungen erfahren hat. Scharf getrennt stehen also mindestens seit dem Jura die Froschlurche den Schwanzlurchen gegenüber. Soweit nach rezenten und fossilen Skeletten zu urteilen ist, knüpft kein osteologisches Merkmal — außer den allgemeinen Amphibiencharakteren, außer den nicht verknöcherten Epiphysen der Gliedmaßenknochen und dem fehlenden Parietalforamen — ein engeres Band zwischen Urodelen und Anuren. Die normalen Urodelen, die Salamandriden, haben in Form und Skelett teils primitivste Tetrapodencharaktere gewahrt — z. B. fast gleiche Größe von Vorder- und Hinterextremität, Bau der Wirbel — teils zeigen sie Merkmale der Reduktion, wie im Schultergürtel. Bei den Anuren dagegen alles weit und zwar progressiv spezialisiert, mit Ausnahme der knöchernen Erhaltung des Jochbogens, der eine Erinnerung an Stegocephalen bildet. Wenn die Anuren von den Urodelen abzweigten, dann muß solche Abtrennung lange vor jurassischer Zeit stattgefunden haben. Die Paläontologie kann aber keinen Beweis für die Abstammung der Anuren von den Urodelen liefern.

Für die eigenartige Ausbildung der Anurengliedmaßen scheint es in alter Zeit ein Analogon zu geben: bei der zu den Stegocephalen gehörenden Mikrosaurierform †Pelion Lyelli Wym. aus dem Oberkarbon von Linton, Ohio. Dort sind — aber bei unverkürzter Wirbelsäule — auffällig lange Gliedmaßen, besonders Hinterfüße, vorhanden. Erneute Untersuchung von †Pelion wird hoffentlich Gewißheit geben, ob hier Formgleichheit durch Abstammung oder nur Konvergenz zwischen dem Mikrosaurier †Pelion und den Froschlurchen vorliegt, und weiter, ob nicht vielleicht die Anuren aus einer anderen Wurzel in den Stegocephalen sproßten als die Urodelen, wie solche u. a. von E. D. Cope vermutet wurde.

3. Gymnophionen (Coecilia, Apoda). Fossile Blindwühlen sind unbekannt, und zur Beurteilung ihrer phyletischen Stellung fehlt jede paläontologische Grundlage. Die z. B. an Ichthyophis und Siphonops erinnernde Schädelform des unterpermischen Urodelen †Lysorophus beweist ebensowenig die Abstammung der Gymnophionen von den Schwanzlurchen, wie aus der Fußlosigkeit ein genetischer Zusammenhang zwischen den stegocephalen †Aistopoden und den Gymnophionen geschlossen werden dürfte. Das in den wesentlichen Deckknochen vollkommen anders gestaltete und vereinfachte Schädeldach der Aistopoden beweist schon allein, daß die von A. Fritsch und G. Steinmann angenommene Verbindung der karbon-permischen Aistopoden mit den lebenden Blindwühlen unmöglich ist. Der stegale Schädeltyp und die bei den meisten Gymnophionen vorkommenden Bauchschuppen könnten ja direkt auf †Stegocephalen (†Mikrosaurier?) als Ahnen hinweisen. Doch unter diesen ist bis jetzt keine Form oder Gruppe bekannt, die zwanglos die auch zeitlich sehr weite Lücke zwischen Stegocephalen und Gymnophionen schlösse. Für die Gymnophionen in den Stegocephalen eine Sonderwurzel zu finden, entbehrt vorläufig ebenso der Beweismöglichkeit, wie die verschiedenen Versuche, sie direkt von den Urodelen abzuleiten, hypothetisch bleiben.

4. Paläogeographische Schlußbemerkungen. Die sehr lückenhafte Kenntnis fossiler Reste der drei paläontologisch unverbundenen Amphibienstämme, die es nicht ermöglicht, die Fragen der Stammesgeschichte befriedigender Lösung entgegenzuführen, verhindert es auch, die Amphibien in geologischer und paläogeographischer Beziehung erfolgreich auszunutzen. Eins ist eindeutig: die Art ihres Vorkommens. Auch fossile Formen kennen wir nur aus Süßwasser- und Landbildungen, also von Landfesten der Vergangenheit.

Aber: Wo entstanden die Amphibien und auf welchen Wegen wurden sie verbreitet?

Der unterpermische Urodele †Lysorophus könnte Nordamerika als Entstehungsgebiet annehmen lassen. Doch Lysorophus ist sicher nicht der Ahn der Urodelen oder der Salamandriden. Die Kreide zeigt uns Urodelen in Europa und Nordamerika. Im Tertiär ist — nach

dem überlieferten Material — die Verbreitung auf Europa beschränkt; heute sind sie über die Nordhemisphäre verbreitet. Die Entstehung der Urodelen in der atlantischen Hälfte der Nordhemisphäre, wo Aeonen hindurch verbindendes Land zwischen Europa und Amerika lag, ist höchstwahrscheinlich; möglich ist es, daß die Verbreitungswege vornehmlich vom westlichen Europa ausgingen, wie es für die Megalobatrachiden und wohl auch für die Amblystomatinen sehr wahrscheinlich ist.

Für die Anuren, jetzt auf den Ländern der Nord- und Südhemisphäre gleichmäßig verbreitet, ließe sich ähnliches wie für die Urodelen annehmen. Im oberen Jura: Froschlurche in Europa und Nordamerika, zu einer Zeit, da die Brücken zwischen Europa und Nordamerika schon sehr wesentlich eingeschränkt waren; Heimat oder Entstehungsgebiet ist also die Nordhemisphäre lange vor jurassischer Zeit. Im Tertiär, und soweit Ueberlieferung reicht, ganz überwiegendes Vorwalten im westlichen Europa. Manche Wanderungen und Verbreitungswege müssen sehr alt sein, wie Anuren im Eocän von Wyoming, der Ranide Oxyglossus im Eocän Ostindiens und das Vorkommen der Cystignathiden im Diluvium Brasiliens beweisen. Details ableiten zu wollen, wäre phantastisch.

Dunkel wie über die Geschichte des Gymnophionenstammes herrscht über sein Werdegebiet und seine Wanderwege, die ihn weit über den Tropengürtel verbreiteten.

Literatur. *Zusammenstellungen in* **K. A. v. Zittel,** *Handbuch der Palaeontologie, 1887 bis 1890, Bd. 3, und in* **Derselbe,** *Grundzüge der Palaeontologie, II. Abt. Vertebrata, 2. Aufl., 1911.*

J. F. Pompeckj.

Amphineura.

Die Gruppe der Amphineuren. 1. Die Solenogastren: a) Körperform und Integument. b) Nervensystem. c) Muskulatur. d) Darm und Kiemen. e) Herz, Gefäße und Geschlechtsorgane. f) Entwickelung. g) Systematik. h) Biologie. i) Geographische Verbreitung. 2. Die Polyplacophoren oder Chitonen: a) Rückenschale. b) Muskulatur. c) Nervensystem. d) Verdauungsorgane. e) Herz, Gefäße, Keimdrüsen, Niere. f) Entwickelung. g) Biologie. h) Verbreitung. i) Systematik.

Die Gruppe der Amphineuren. Unter dem Namen Amphineuren hat Hermann von Jhering zwei Tiergruppen vereinigt, die ein paar seitliche Längsnervenstränge besitzen und die sicher in einer unmittelbaren verwandtschaftlichen Beziehung zueinander stehen, obwohl sie in mehreren Organen große Unterschiede aufweisen. Es sind die Gruppen der Solenogastren und der Polyplacophoren, von denen jene nähere Beziehungen zu gewissen Würmern, besonders den Gordiiden und Anneliden, diese zu den eigentlichen Mollusken erkennen läßt. Die Amphineuren stellen somit wichtige Bindeglieder zwischen Würmern und Mollusken dar.

Unsere Kenntnis von den Solenogastren ist noch jung. 1841 wurde die erste Art, Chaetoderma nitidulum, von Lovén beschrieben; gegenwärtig kennen wir über 60 Arten, die zu etwa 30 Gattungen gestellt werden. Da sie mit wenigen Ausnahmen anatomisch untersucht sind, kann man unsere Kenntnis von der Gruppe schon als erfreulich bezeichnen, wenngleich sicher noch viele neue Formen werden in Zukunft aufgefunden werden.

I. Die Solenogastren. 1a) Die Körperform ist wurm- oder walzenförmig (Fig. 1) drehrund oder seitlich etwas zusammengedrückt, zuweilen am Rücken gekielt, das Verhältnis der Länge zum Querdurchmesser schwankt zwischen weiten Grenzen. In der Regel verläuft in der Mitte der Unterseite eine Längsrinne, die hinter der Mundöffnung beginnt und vor dem After aufhört oder sich in diesen hinein fortsetzt; in ihr liegt meistens eine flimmernde, unten zugeschärfte Hautfalte. Mund- und Afteröffnung sind an den Körperenden oder nicht weit davon an der Unterseite gelegen.

Die Oberfläche des Körpers ist stets mit einer Cuticula bekleidet, in der Kalkkörperchen stecken; jene kann ziemlich dünn oder sehr dick sein, diese haben bald die Form von Schuppen, bald von Nadeln, die zumeist hohl sind, zuweilen kommen da-

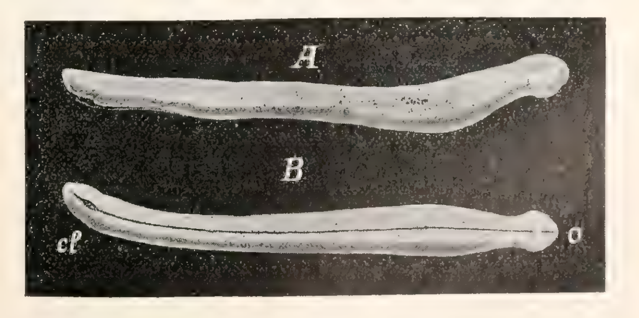


Fig. 1. Proneomenia Sluiteri. 2/3 Größe. A von der rechten Seite, B von unten. o Mund, cl After.

neben andere Formen vor, z. B. rinnenförmige mit dreieckiger Verbreiterung am Ende oder hakenförmige. Wenn die Cuticula bedeutende Stärke hat, bildet in ihr das darunter liegende Epithel keulenförmige Fortsätze, die vielleicht als Hautsinnesorgane anzusehen sind. Ein kleines Grübchen am Hinterende stellt ein Sinnesorgan von zweifelhafter Bedeutung dar. Augen und Otocysten fehlen.

1b) Das Nervensystem der Solenogastren (Fig. 2) besteht aus einem Ganglion am Vorderende, das hauptsächlich die Tastfäden der Mundhöhle versorgt, und aus zwei Paaren von Längsstämmen, von denen die ventralen miteinander und mit den seitlichen durch mehrere quere Verbindungen zusammenhängen. Ein Paar kleiner Ganglien innerviert den Vorderdarm.

Fig. 2. Nervensystem von Neomenia carinata, schematisch. Nach Wirén. 1 Cerebralganglion, 2 vorderes Seitenganglion, 3 vorderes Pedalganglion, 4 Seitenstrang, 5 Bauchstrang.

1c) Die Körpermuskulatur besteht aus einem vierschichtigen Hautmuskelschlauch, der vollkommen wie bei gewissen Würmern beschaffen ist; daneben finden sich unter dem Darm verlaufende quere Bänder und meist regelmäßig zwischen den Darmtaschen angeordnete von der Bauchmitte nach den Seiten verlaufende schräge Züge.

1d) Darm und Kiemen. Vorn am Anfang des Darmkanals findet sich in der Regel eine mit mehr oder weniger zahlreichen Tastfäden ausgestattete Mundhöhle. Der eigentliche Vorderdarm zeigt sehr verschiedene Ausbildung, die für die Systematik wichtig ist; bald ist er vorstülpbar oder nicht, bald gerade oder geknickt, bald weit oder eng, häufig mit verschiedenartigen Drüsen ausgestattet, nicht selten mit einer kleinen Reibplatte, die sich ähnlich der von Mollusken verhält, aber doch in der Regel einfacher ist und einer zusammenhängenden Grundmembran zu entbehren pflegt. Der Mitteldarm zeigt häufig jederseits eine Reihe regelmäßiger Seitentaschen (Fig. 3), ausnahmsweise hat sich der drüsige

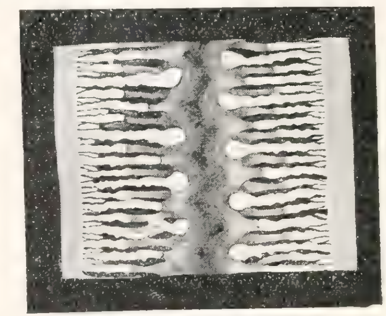


Fig. 3. Horizontalschnitt durch ein Stück der mittleren Gegend des Körpers von Proneomenia Sluiteri. Man sieht die von rechts und links in die Mitteldarmhöhle vorragenden Septen erster, zweiter, dritter und vierter Ordnung. In der Tiefe die dorsale Wand des Mitteldarmes und seine Rinne, welche in die Zwitterdrüse einschneidet.

Teil von dem leitenden als längsgerichteter Blindsack gesondert. Hinten verengt sich der Darm und mündet in einen erweiterten Hohlraum, der meistens auch die Ausmündungen der Keimdrüsen enthält. Zuweilen weist dieser hintere Hohlraum eine Anzahl mehr oder weniger starker Radiärfalten auf (Fig. 5), die als Kiemen dienen, selten enthält er zwei doppelfiedrige Kiemen (Fig. 4).

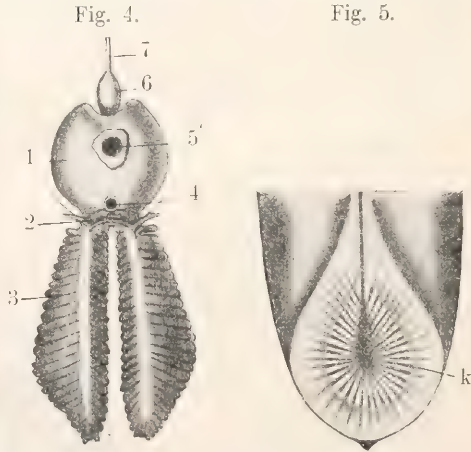


Fig. 4. Herz und Kiemen von Chaetoderma nitidulum von oben gesehen. Nach Wirén. 1 Herz, 2 abführendes Kiemengefäß (Kiemenvene), 3 Kieme, 4 hinteres Rückengefäß, 5 dorsale Oeffnung im Herzen, durch welche die Kiemenretraktoren hindurchtreten, 6 vordere Anschwellung des Herzens als rudimentäre Herzkammer aufgefaßt, 7 vorderes Rückengefäß.

Fig. 5. Hinterende von Neomenia carinata von hinten und unten gesehen. Nach Wirén. Man sieht in die Kloake hinein, in der sich als Falten der Wand, im Kranze angeordnet, die Kiemen k erheben.

1e) Herz, Gefäße und Geschlechtsorgane. Das Herz ist sehr einfach. Es besteht aus einer hinteren Vorkammer und einer vorderen Kammer, die bald im Hohlraum des Perikards frei liegt, bald mit dessen oberer Wand verwachsen ist; sie setzt sich nach vorn in eine unvollkommen abgegrenzte Aorta fort, die geradlinig über dem Darm und unter der Leibeswand verläuft und sich vorn in den mehr oder weniger weiten Hohlraum öffnet, der die Eingeweide umgibt (Hämocöl). Unter dem Darm ist zuweilen ein Längsgefäß angedeutet, das sich bei kiementragenden Gruppen hinten bis zu den Kiemenfältchen fortsetzt. Aus diesen gelangt das Blut sogleich in die Vorkammer des Herzens. Das Perikard steht vorn in offener Verbindung mit den Keimdrüsen, hinten mit deren Ausführungsgängen, daher müssen die Keimstoffe durch das Perikard hindurchgelangen, dieses ist nur ein Teil der Geschlechtsorgane. Ueber dem Darm liegen neben der Aorta die beiden meist einfach sackförmigen Keimdrüsen; selten verschmelzen sie in der Mitte zu einem Raum oder sie bestehen aus je einer Reihe von Taschen, die in einen Längsgang münden. Sie sind zwittrig. Die Ausführungsgänge (Fig. 6) sind zuerst nach vorn gewendet, alsdann biegen sie nach hinten um, werden drüsig und vereinigen sich häufig vor ihrer Mündung miteinander. An der Umbiegungsstelle finden sich in der Regel Anhänge, die als Samenbehälter dienen. Zuweilen liegt die Mündung vor der Afteröffnung, meistens aber in dem hinteren Hohlraum, in den auch der Darm mündet; selten hat sich ein scheidenartiger vorderer Fortsatz dieses Hohlraumes ausgebildet. Eigentliche Begattungsorgane sind nur ausnahmsweise vorhanden, doch kommen nicht selten verschiedene Kalkstacheln und Häkchen in Verbindung mit den Fortpflanzungsorganen vor, die wahrscheinlich bei der Begattung eine Rolle spielen.

1f) Entwickelung. Ueber die Entwicklung der Solenogastren ist noch wenig bekannt, über 2 Arten sind einige Angaben gemacht worden. Die einzeln abgelegten Eier erfahren eine inäquale Furchung und frühzeitig werden die großen Zellen eingezogen. Durch 2 Ringfurchen werden 3 Abschnitte angedeutet, deren mittlerer einen Wimperkranz trägt. Dann erhebt sich in der Einstülpung ein Vorsprung, der allmählich hervortritt und den größten Teil des Körpers mit den Kalkplättchen bildet, während die Wimperung sich rückbildet. Die Larve einer Art, die in erwachsenem Zustande Kalknadeln besitzt, ist durch die Gegenwart von Kalkplättchen ausgezeichnet.

1g) Systematik. Für die systematische Einteilung werden vor allem die Körperbedeckung, die Ausbildung des Vorderdarms mit seinen Drüsen und mit der — häufig fehlenden — Reibplatte und die Ausführungsgänge der Keimdrüsen mit den Anhangsorganen berücksichtigt. Gegenwärtig kann man 5 Familien annehmen.

1. Familie Chaetodermatidae ohne Bauchrinne, mit dünner Cuticula und flachen, zuweilen nadelförmigen Kalkkörpern; 2 gefiederte Kiemen; Vorderdarm mit ziemlich verschiedenartiger Bewaffnung, Mitteldarm meist mit gesonderter Drüse; Geschlechtsgänge getrennt, ohne äußere Nebenorgane. Gattungen Chaetoderma Lovén, Prochaetoderma Thiele und Limifossor Heath.

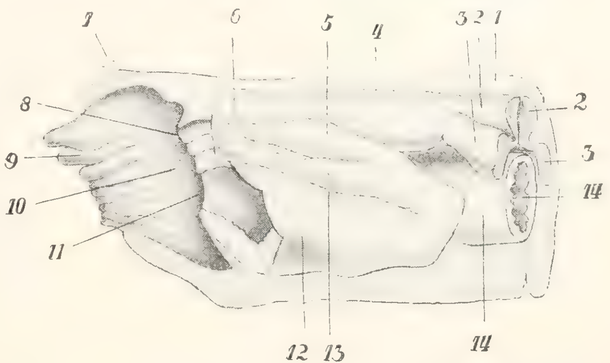


Fig. 6. Paramenia impexa. Hinteres Leibesende; von der rechten Seite ist das Integument wegpräpariert gedacht, ebenso ein Stück der Wandung des rechten Nephridiums. Schematisch. Nach Pruvot. 1 Integument, 2 Ovarialteil der Zwitterdrüse, 3 Hodenteil der Zwitterdrüse, nahe der Stelle, wo letztere in das Pericard 4 einmündet, 5 Drüsenanhang des rechten Nephridiums, 6 dorsale Commissur der Pleurovisceralstränge, 7 als Sinnesknospe gedeutetes Organ, 8 Mündung des Enddarmes in die Kloake, 9 Kieme, 10 Kloake, 11 Mündung der Nephridien in die Kloake, 12 unterer Teil des Nephridiums, 13 oberer Teil des rechten Nephridiums, welcher oben in das Pericard mündet, 14 Enddarm.

2. Familie Neomeniidae. Körper kurz und dick mit Bauchrinne und meistens mehreren Fältchen darin; Cuticula ziemlich dick, meist mit Epidermisfortsätzen und mit nadelförmigen und rinnenförmigen Kalkkörpern; radiäre Kiemenfältchen; Vorderdarm mit subepithelialen Drüsen, mit oder ohne Reibplatte, meist vorstreckbar, Mitteldarm ohne gesonderte Drüse; Geschlechtsgänge

getrennt oder am Ende vereinigt, zuweilen in einen scheidenartigen Raum mündend, häufig in Verbindung mit Stacheln, die eine Anhangsdrüse aufweisen. Gattungen Neomenia Tullberg; Hemimenia Nierstrasz und Archaeomenia Thiele.

3. Familie Proneomeniidae. Körper langgestreckt mit Bauchrinne und einer Falte darin; Cuticula dick mit keulenförmigen Epithelfortsätzen und meist hohlen nadelförmigen Kalkkörpern; Kiemen fehlen meistens; Vorderdarm in der Regel mit Anhangsdrüsen und 2- oder mehrreihiger Reibplatte; Geschlechtsgänge meistens am Ende vereinigt und in die hintere Höhle mündend, häufig mit nadel- oder hakenförmigen Kalkkörpern verbunden. Gattungen Proneomenia Hubrecht, Amphimenia Thiele, Epimenia Nierstrasz, Anamenia Nierstrasz, Dinomenia Nierstrasz, Simrothiella Pilsbry, Rhopalomenia Simroth, Pruvotia Thiele und Strophomenia Pruvot.

4. Familie Macellomeniidae. Körper mehr oder weniger langgestreckt, mit Bauchrinne; meist mit starker Cuticula und mit nadelförmigen, zuweilen daneben oder allein mit anders geformten Kalkkörpern; Kiemen vorhanden; Vorderdarm mit oder ohne Reibplatte, Speicheldrüsen von verschiedener Form; Geschlechtsgänge vereinigt, zuweilen in Verbindung mit Begattungswerkzeugen. Gattungen Pruvotina Cockerell, Pararrhopalia Simroth, Proparamenia Nierstrasz, Cyclomenia Nierstrasz, Kruppomenia Nierstrasz, Uncimenia Nierstrasz und Macellomenia Simroth.

5. Familie Lepidomeniidae. Körper meistens mit Bauchrinne; Cuticula dünn, in der Regel mit schuppenförmigen Kalkkörpern, ohne Epithelfortsätze; Kiemen fehlen; Vorderdarm meistens mit Reibplatte und mit verschieden geformten Drüsen; Geschlechtsgänge getrennt oder vereinigt, zuweilen mit Begattungswerkzeugen. Gattungen Lepidomenia Kowalevsky und Marion, Echinomenia Simroth, Ichthyomenia Pilsbry, Stylomenia Pruvot, Dondersia Hubrecht, Myzomenia Simroth, Nematomenia Simroth und Notomenia Thiele.

1 h) Biologie. Von der Lebensweise der Solenogastren weiß man noch wenig, manche leben im Schlamm, andere sitzen auf Gorgoniden oder Hydrozoen aufgewunden und nähren sich von den Polypen, wenige führen eine räuberische Lebensweise. Die Beweglichkeit ist verschieden, bei Tieren mit sehr starker Cuticula gering und vermutlich wird bei ihnen nur durch die Wimperrinne eine Ortsbewegung ermöglicht.

1 i) Geographische Verbreitung. Ueber die geographische Verbreitung der Solenogastren ist wenig zu sagen; die Mehrzahl der Gattungen ist nur durch je eine Art vertreten und allein die europäischen Meere sind leidlich genügend daraufhin durchforscht. Eine Mehrzahl von Arten kennen wir außerdem nur aus den Meeren um die Sunda-Inseln, wenige sind von den amerikanischen, afrikanischen und australischen Küsten beschrieben. Sie fehlen weder in den tropischen, noch in den arktischen Meeren. Ihre vertikale Verbreitung scheint an keine bisher festzustellenden Grenzen gebunden zu sein, einige Arten sind bis in sehr bedeutende Tiefe herab gefunden worden.

2. Die Polyplacophoren oder Chitonen.

2 a) Sie sind von einer achtteiligen Rückenschale (Fig. 7) bedeckt, der sich eine ringförmige, mit schuppen- oder nadelförmigen Kalkkörpern bekleidete Falte anschließt; an der Unterseite ist ein länglicher Kriechfuß, der mit dem von Schnecken Aehnlichkeit zeigt, davor eine kurze schnauzenartige Erhebung sichtbar. In der Rinne zwischen

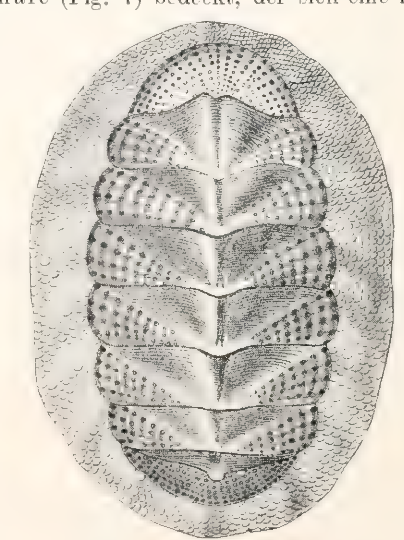


Fig. 7. Chiton. Habitusbild. Nach Prêtre Voyage de l'Astrolabe.

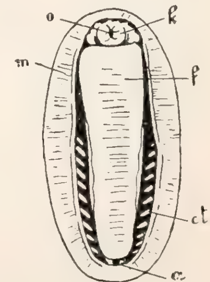


Fig. 8. Schematische Darstellung eines Chitoniden von der Ventralseite. m Mantel, o Mund, k Schnauze, f Fuß, ct Kiemen, a After.

dem Fuß und der Ringfalte finden sich jederseits mehrere doppelfiedrige Kiemen und in der Mitte der After (Fig. 8). Die Schalenstücke (Fig. 9) sind durch Muskeln beweglich miteinander verbunden, so daß die Tiere

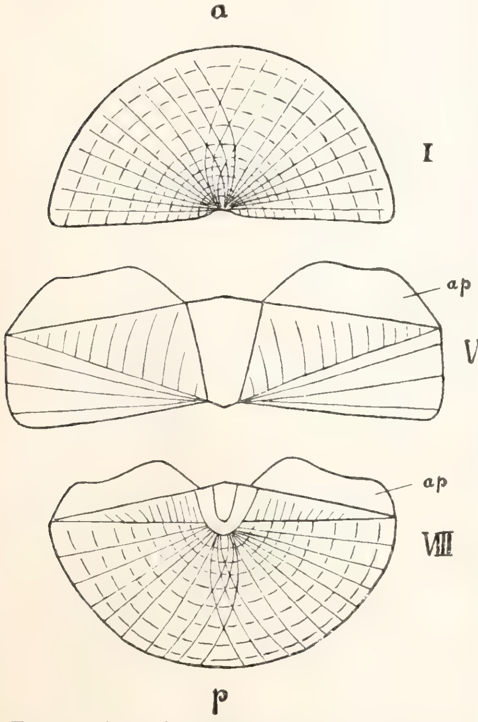


Fig. 9. Drei Schalenstücke von Chiton von oben gesehen. Nach Sampson. a vorn, p hinten, I erstes, V fünftes, VIII achtes Schalenstück, ap Apophysen.

sich einrollen und strecken können. Zum Ansatz dieser Muskeln haben die 7 hinteren Stücke vorn je 2 Fortsätze (Apophysen), die unter dem nächstvorderen Stück liegen: auch am Rande zum Ansatz der Muskeln der Ringfalte hat sich bei der großen Mehrzahl eine Verbreiterung der unteren Schalenschicht (Articulamentum) ausgebildet, die an den Endstücken mehrere Einschnitte, an den Mittelstücken in der Regel je einen solchen jederseits aufweist. Diese Einschnitte sind neben der Skulptur, Form und Farbe der Schale systematisch wichtig. Ebenso wichtig ist die Bekleidung der Ringfalte mit meistens schuppenförmigen Kalkkörpern, zwischen denen auf der Oberseite und hauptsächlich am Rande nadel- oder keulenförmige Körperchen vorhanden sind; zuweilen verschmälern sich die Schuppen oder sie verlängern sich, so daß auch sie nadel- oder stachelförmig werden können. Sie werden durch eine kräftige Cuticula miteinander verbunden, daher verhält sich die Bekleidung der Ringfalte ähnlich der Körperbedeckung der Solenogastren, was bei einigen langgestreckten Formen (Cryptoplax), deren Schale sich bedeutend verkleinert und deren Fuß sich sehr verschmälert hat, so daß ihr Körper dem von Neomenia ähnlich ist, dazu geführt hat, zu jenen eine nähere Verwandtschaft anzunehmen, die aber tatsächlich nicht vorhanden ist. Die Schale wird von Epithelfortsätzen (Aestheten) durchzogen, die an der Oberfläche durch Kappen von Conchinsubstanz abgeschlossen werden; in der Regel enthält je ein Schalenwärzchen einen solchen Fortsatz. Von diesem entspringt eine Anzahl kleinerer Fortsätze (Micrästheten). In 2 Gruppen von Chitonen hat sich ein Teil der Aestheten zu augenähnlichen Organen umgebildet (Fig. 10), indem sich eine Linse und Pigment entwickelt haben. Diese Organe dürften als Sinnesorgane anzusehen sein.

2b) Muskulatur. Die Muskulatur entspringt in der Hauptsache von der Schale (Fig. 11), von da geht sie in den Kriechfuß, in den Körperrand und zu den benachbarten Schalenstücken; sie ist von der der Solenogastren ganz verschieden.

2c) Nervensystem. Dagegen ist das Nervensystem dem der Solenogastren sehr ähnlich, nur im vorderen Teil sind einige wesentliche Unterschiede wahrzunehmen. Höhere Sinnesorgane (Kopfaugen, Hörbläschen oder Statocysten), auch fühlerförmige Anhänge fehlen. In der Mundhöhle unter der Zunge findet sich ein vorstreckbares, vielleicht dem Geschmack dienendes Sinnesorgan. Am Körperrande, besonders an der äußeren Kante und an der Begrenzung gegen die Kiemenrinne, dürfte ein niederes Tastgefühl ausgebildet sein. In der Kiemenrinne sind bei einigen Arten verschiedene epitheliale Sinnesorgane gefunden worden.

2d) Verdauungsorgane. Die Verdauungsorgane sind von denen der Solenogastren sehr verschieden und verhalten sich wie bei den niederen Mollusken. Die Mundhöhle ist geräumig und enthält eine von einer Reibplatte bedeckte Zunge, die aus einem knorpelähnlichen Gewebe in der Umgebung eines Paares von Blasen und der Muskulatur besteht. Die stets vorhandene Reibplatte ist sehr einförmig; jede Querreihe enthält jederseits von der Mittelplatte 8 Platten, von denen die 3., 4. und die 3 äußersten stets ohne Schneiden sind, während die 2. am größten und mit einer starken, ablösbaren, schwarzen Schneide versehen ist. Der Zunge gegenüber finden sich 2 flache Drüsensäcke, während eigentliche Speicheldrüsen fehlen. Der Vorderdarm besitzt 2 große Drüsen, während in den Magen eine wohl entwickelte Leber mündet; der Enddarm ist lang und bildet einige Schlingen, er mündet hinten zwischen Fuß und Ringfalte.

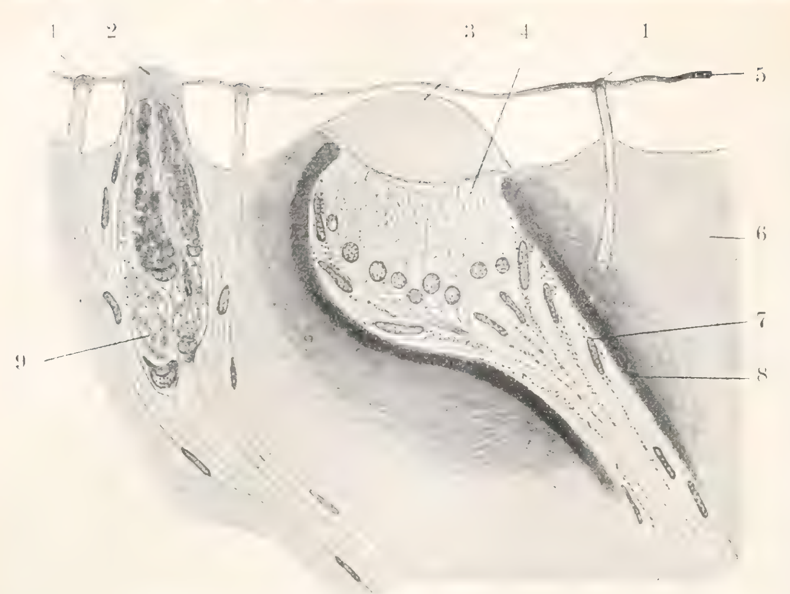


Fig. 10. Aestheten und Schalenauge von Tonicia fastigiata. Etwas schematisiert. Nach Plate. 1 Chitinkappe eines Mikrästheten, 2 Chitinkappe eines Hauptästheten, 3 Linse, 4 Retina, 5 Periostracum, 6 Tegmentum, 7 Pigmentzelle, 8 Pigment, 9 Drüsenzelle.

2e) Herz, Gefäße, Keimdrüsen, Niere. Die Lage des Herzens, der Aorta und der Keimdrüsen ist ähnlich wie bei den Solenogastren, indessen hat das Herz jederseits einen Vorhof. Die übrigen Bluträume sind durch die Gestaltung des Körpers und der Eingeweide beeinflußt bedeutend komplizierter; aus ihnen gelangt das Blut zu den Kiemen und alsdann in die Vorhöfe. Das Perikard ist von der Keimdrüse ganz getrennt;

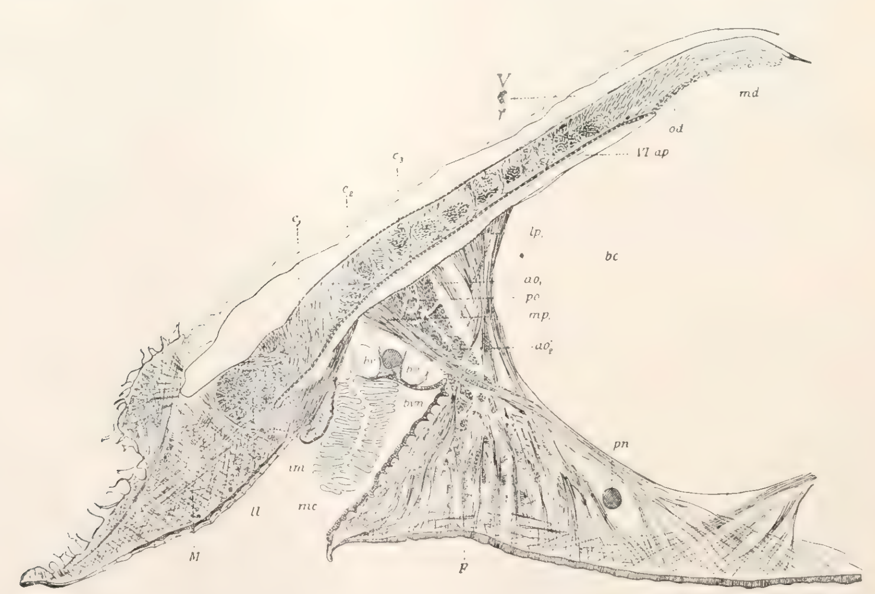


Fig. 11. Querschnitt durch Chiton. Zur Demonstration der Muskulatur. Nach Sampson. Der Schnitt geht durch die vordere Gruppe der Fußmuskeln unter Schalenstück VI. Es ist nur eine Hälfte des Schnittes dargestellt. V fünftes Schalenstück, VI ap Apophyse des sechsten Schalenstückes, ba zuführendes, bv abführendes Kiemengefäß, bvn Pleurovisceralstrang, bc Körperhöhle, F Fuß, M Mantel, mc Mantelhöhle, pn Fußstrang; Muskeln: ao_1 antero-obliquus der vorderen, ao'_2 antero-obliquus der hinteren Gruppe von Fußmuskeln, po postero-obliquus der vorderen Gruppe, mp_1 medio-pedalis der vorderen Gruppe, lp_1 latero-pedalis der vorderen Gruppe. ll Musculus longitudinalis lateralis der Schale, md Musculus medianus-dorsalis (rectus) der Schale, od Musculus obliquus-dorsalis (obliquus) der Schale; c_1, c_2, c_3 Muskelkissen (transversus) zwischen den übereinander liegenden Teilen zweier r Schalenstücke; im innerer Mantelmuskel.

seine Ausführungsgänge haben daher eine andere Aufgabe als bei den Solenogastren, sie dienen bei den Chitonen als Nieren. Diese liegen bald im hinteren Teil des Tieres, bald setzen sie sich durch den größten Teil der Eingeweidemasse nach vorn fort (Fig. 12). Die Keimdrüse ist mit sehr wenigen Ausnahmen einheitlich, und zwar sind die Geschlechter getrennt. Jederseits entspringt ein Ausführungsgang, der wie die Niere in der Kiemenrinne ausmündet. Begattungsorgane fehlen.

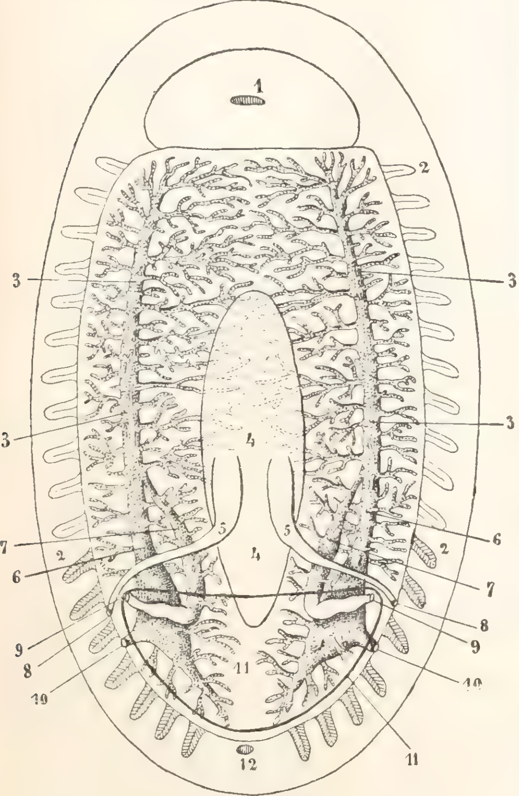


Fig. 12. Nephridial- und Genitalsystem von Chiton. Schematisiert. Von oben. 1 Mund, 2 Kiemen, 3 nach vorn verlaufender, unpaarer Schenkel des Nephridiums mit seinen seitlichen Verzweigungen, 4 Gonade, 5 Ausführungsgänge der Gonade, 6 zur äußeren Oeffnung (10) verlaufender Schenkel des Nephridiums, 8 Genitalöffnungen, 9 Renopericardialtrichter, 10 Nephridialöffnung, 11 Pericard, nur durch eine Contourlinie angedeutet, 12 After.

2f) Entwickelung. Die Eier, deren Hülle häufig zotten- oder stachelförmige Fortsätze aufweist, werden in der Kiemenrinne befruchtet und entwickeln sich hier zuweilen über das Larvenstadium hinaus. Dieses besitzt einen Wimperkranz und der ursprünglich am Hinterende gelegene Blastoporus rückt allmählich ventral nach vorn und tritt in Beziehung zur Mundöffnung. Am Rücken entstehen hinter dem Wimperkranz die Schalenteile, während die Larve sich streckt. Ein paar Augen bilden sich seitlich hinter dem Wimperkranz, sie verschwinden später.

2g) Biologie. Die meisten Chitonen leben in der Gezeitenzone, häufig in der Brandung, zuweilen in Felsspalten oder in Korallenriffen; nur wenige finden sich in der Tiefsee.

2h) Verbreitung. Im Gegensatz zu den Solenogastren kann man von den Placophoren annehmen, daß die Mehrzahl der lebenden Arten benannt und beschrieben ist. Die ursprüngliche Gattung Lepidopleurus ist durch alle Meere, auch in der Tiefe verbreitet, die meisten übrigen Gattungen bewohnen beschränktere Gebiete. Im ganzen ist das australische Gebiet am reichsten an Arten aus verschiedenen Familien, nur die Trachydermoninae sind dort gar nicht, die Chaetopleurinae fast nicht vertreten.

2i) Systematik. Während noch vor einigen Jahrzehnten nur 2 Gattungen, Chiton und Chitonellus (= Cryptoplax) unterschieden wurden, hat man seitdem ein System ausgearbeitet, das zahlreiche Gattungen in 6 Familien umfaßt.

Die Anordnung ist gegenwärtig folgende, wobei die Untergattungen nicht berücksichtigt sind:

I. Unterordnung Lepidopleurina ohne Einschnitte am Schalenrande.

Familie Lepidopleuridae. Meist ziemlich kleine Tiere, in der Regel mit weißer Schale; Körperrand mit kleinen Schüppchen, seltener mit nadelförmigen Kalkkörpern. Gattungen Lepidopleurus Risso; Hanleya Gray; Choriplax Pilsbry; Oldroydia Dall und Hemiarthrum Carpenter.

II. Unterordnung Chitonina mit Einschnitten am Schalenrande.

1. Familie Callochitonidae. Zahl der Schalenschlitze am Vorderrande verschieden. Die große Radulaplatte dreizähnig, ohne flügelförmigen Anhang. Unterfamilie Trachydermoninae ohne Schalenaugen, Körperrand mit kleinen schuppen- oder nadelförmigen Kalkkörpern und Gruppen größerer Nadeln. Gattungen Trachydermon Carpenter; Tonicella Carpenter; Schizoplax Dall; Middendorffia Carpenter; Nuttallina Carpenter; Mopaliella Thiele; Nuttalochiton Plate und Notochiton Thiele. Unterfamilie Callochitoninae mit zahlreichen kleinen Schalenaugen. Gattungen Callochiton Gray und Eudoxochiton Shuttleworth.

2. Familie Mopaliidae. Vorderstes Schalenstück mit 8 Schalenschlitzen am Rande, Körperrand mit borstenförmigen,

seltener mit nadelförmigen Gebilden außer den kleinen Kalkkörperchen. Radula wie in Familie 1. Gattungen Ceratozona Dall; Mopalia Gray; Placiphorella Carpenter; Plaxiphora Gray; Frembleya H. Adams; Katharina Gray; Amicula Gray.

3. Familie Cryptoplacidae. Vorderstes Schalenstück mit 5 oder 3 Einschnitten, Körperrand häufig sehr breit im Verhältnis zur Schale, mit nadel- oder keulenförmigen Kalkkörpern; Radula wie in den vorigen Familien. Unterfamilie Acanthochitinae mit 5 Schlitzen am Vorderrande. Gattungen Craspedochiton Shuttleworth; Aristochiton Thiele; Cryptoconchus Blainville; Acanthochites Risso; Cryptochiton Middendorff. Unterfamilie Cryptoplacinae mit 3 Randschlitzen, Schalenteile schmal, meist z. T. auseinandergerückt. Gattungen Choneplax Carpenter; Cryptoplax Blainville.

4. Familie Ischnochitonidae. Große Radulaplatte häufig mit flügelförmigem Anhang und verschieden geformter, meistens zweizähniger Schneide; Schalenrand nicht kammartig eingeschnitten. Unterfamilie Chaetopleurinae mit kleinen Schüppchen auf dem Körperrande und eingestreuten borstenförmigen, seltener nadelförmigen Gebilden. Gattungen Calloplax Thiele; Callistoplax Carpenter; Chaetopleura Shuttleworth; Dinoplax Carpenter. Unterfamilie Ischnochitoninae mit meistens größeren Schuppen und nur am Rande mit nadelförmigen Kalkkörpern. Gattungen Ischnochiton Gray; Tonicina Thiele; Callistochiton Carpenter.

5. Familie Chitonidae. Große Radulaplatte mit großem Flügel und meist abgerundeter Schneide, Schalenränder kammartig eingeschnitten. Unterfamilie Chitoninae ohne Schalenaugen, Körperrand mit großen Schuppen. Gattung Chiton Linné. Unterfamilie Acanthopleurinae mit Schalenaugen, Bekleidung des Körperrandes verschieden. Gattungen Sclerochiton Carpenter; Acanthopleura Guilding; Enoplochiton Gray; Tonicia Gray und Schizochiton Gray.

Literatur. *Eine übersichtliche Darstellung alles Wissenswerten, auch der Literatur über die Amphineura hat* ***Nierstrasz*** *in den Ergebnissen und Fortschr. d. Zoologie Bd. 1 und 2. 1908 und 1910 gegeben. —* ***Tryon-Pilsbry*** *Manual of Conchology ser. 1 Bd. 14, 15 1892/3. —* ***Thiele*** *Revision des Systems der Chitonen. Zoologica Bd. 56, 1909.*

J. Thiele.

Amphineura.

Paläontologie.

1. Fossilmaterial. 2. Die fossilen Polyplacophoren. 3. Systematik und Phylogenie. 4. Zweifelhafte Formen.

1. **Fossilmaterial.** Wie die übrigen Klassen der Mollusken, so lassen sich auch die Amphineuren weit — bis ins Unter-Silur — zurückverfolgen. Die Kenntnis fossiler Formen beschränkt sich allein auf die Ordnung der mit acht Rückenplatten gepanzerten Polyplacophora Blv. und leider ist diese Kenntnis sehr unvollkommen, denn fossile Amphineuren sind große Seltenheiten. Zumeist liegen nur isolierte Rückenplatten vor, und zwar je nur das kalkige Articulamentum der Platten. Ganz selten — im Unter-Silur Schottlands, im Unter-Karbon Belgiens und im Muschelkalk von Rüdersdorf bei Berlin — sind vollständige Panzer gefunden worden, bei deren einigen Spuren der Besetzung des Gürtels mit Stacheln erhalten waren.

Den mehr als 500 lebenden stehen etwa 140 fossile „Arten“ aus allen Formationen mit Ausnahme des Algonkium, Kambrium und der Kreide gegenüber. Recht viele der fossilen Reste sind unsicher, mögen besser auf Cirripeden und anderes zu beziehen sein.

2. **Die fossilen Polyplacophoren.** Die ältesten Formen im Unter Silur — †[1]) Helminthochiton Salt. aus Schottland und Irland — hatten schlanke Panzer mit schmalen, etwa dachförmig geknickten, perforierten Zwischenplatten; sie waren, wie Cowper Reed jüngst zeigen konnte, von einem schmalen, mit dünnen Stacheln besetzten Gürtel umsäumt. Sie müssen in ihrer Form den modernen Schizochiton oder auch manchen Ischnochiton geähnelt haben. Der häufig gezogene Vergleich dieser ältesten Amphineuren mit Chitonellus Lam. (Cryptoplax Gray) ist unrichtig, da Reed an mehreren Individuen von †Helminthochiton Grayiae H. Woodw. und †thraivensis C. R. aus dem Unter-Silur des Girvan-Distrikts (Schottland) das unmittelbare Aneinanderstoßen aller Panzerplatten nachweisen konnte.

Aehnlich schlanke, aber doch schon etwas verbreiterte Formen dauern fort bis ins Karbon: †Gryphochiton Gray, †Chonechiton Carp., deren Panzer — von Details abgesehen — manchen der lebenden Hanleya gleichen. Doch schon im Devon, besonders in der Fauna des Iberger Kalkes im Harz, macht sich lebhaftere Formdifferenzierung bemerkbar. Die bis dahin

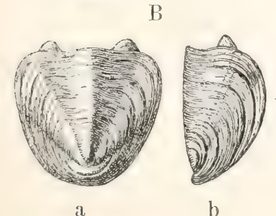
[1]) † vor dem Gattungs- oder Artnamen bedeutet fossile Gattung oder Art.

auffallend kleinen Gelenkfortsätze („sutural laminae") am Vorderrand der Zwischenplatten und der hinteren Endplatte werden vergrößert, z. T. sehr erheblich wie bei †Pterochiton Carp. (= †Anthracochiton Roch.). Die Zwischenplatten

A

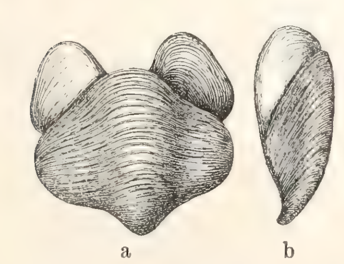
Fig. 1. †Gryphochiton priscus Münst. sp. A. Ganzer Rückenpanzer im Zusammenhang gefunden. Natürliche Größe. Kohlenkalk von Tournai, Belgien. Nach de Koninck aus Stromer.

B



a b

B. Hintere Endplatte mit kleinen Gelenkfortsätzen am Vorderrande. a von oben, b von der Seite. Natürliche Größe. Nach de Koninck.



a b

Fig. 2. Pterochiton gemmatus L. de Kon. var eburonica de Ryckh. Zwischenplatte mit großen Gelenkfortsätzen. a von oben, b von der Seite. Natürliche Größe. Nach de Koninck. Kohlenkalk von Visé, Belgien.

werden kürzer, breiter: †Cymatochiton Dall (= †Protalochiton Roch.). Daneben treten andere, wohl im Silur — in †Priscochiton Bill. — wurzelnde Formen auf: †Probolaeum Carp., die durch besonders starke Wölbung der Zwischenplatten mit hakigem Wirbel und gefurchtem Jugaltrakt in der Mitte gekennzeichnet sind. Im Unter-Karbon Belgiens und Englands erreichen diese paläozoischen Typen — soweit Ueberlieferung lehrt — ihre höchste Blüte. Einzelne besondere Typen treten noch hinzu: †Loricites Carp., in den hinteren Endschildern entfernt an Lorica Ad. erinnernd, und die sehr eigentümliche Form †Glyptochiton de Kon., deren kleine, schmale Platten anscheinend der Gelenkfortsätze ganz entbehren und eine auffallende Skulptur zeigen: einen kräftigen Medianhöcker, der von einem gekerbten Ringwulst umgeben ist. Spärlicher lassen sich die Amphineuren durch das Ober-Karbon — †Pterochiton in Oberschlesien, ? „Chiton" †occidentalis Hildreth in Illinois, †Glaphurochiton carbonarius Raym. in Pennsylvanien — und durch das Perm — Cymatochiton in Rußland, England und Texas — verfolgen; eine Anzahl stark skulptierter Formen treten hier hinzu — „Chitonellus" Kirkby und Yung — deren systematische Stellung ganz unsicher ist.

Der Gesamtheit der paläozoischen Amphineuren ist ein Charakter gemeinsam, sie entbehren vollkommen (wenn man von den unsicheren permischen „Chitonellus" absieht) der Hafträncer („Insertionsplatten") an den Außenrändern des Articulamentum. P. Fischer faßte darum alle paläozoischen Amphineuren unter dem Namen Eochiton als Untergattung von Holochiton Fisch. zusammen und erkannte den von Salter, Gray, Carpenter, de Koninck, de Rochebrune unterschiedenen Gattungen nur den Rang von Sektionen zu. Die Formdifferenzierungen gehen aber im Paläozoikum so weit und stehen z. T. so wenig vermittelt einander gegenüber (vgl. z. B. †Helminthochiton und †Gryphochiton mit †Pterochiton und †Probolaeum), daß eine Unterscheidung von „Gattungen" gerechtfertigt bleibt; sie wird es um so mehr, als zwischen manchen paläozoischen und känozoischen Typen verschiedener Gruppen auffallende Formähnlichkeiten zu bemerken sind. Pilsbry faßt die paläozoischen Amphineuren als Unterordnung Eoplacophora auf, er rechnet ihnen noch einzelne känozoische Gattungen zu: Lepidopleurus Risso, ohne Hafträncer, Hanleya Gray, Hemiarthrum Carp. und Choriplax Pilsbry mit glatten, ungeschlitzten und ungekerbten Haftrándern. Alle übrigen, jüngeren Amphineuren stellt Pilsbry nach der Ausbildung der Hafträncer in zwei andere, scharf von den paläozoischen Eoplacophora geschiedene Unterordnungen: Mesoplacophora mit geschlitzten, ungekerbten Hafträndern, Teleoplacophora mit geschlitzten, gekerbten Hafträndern am Articulamentum (Eoplacophora = Lepidopleurina Thiele; Meso- + Teleoplacophora = Chitonina Thiele).

Aeußerst wenig ist von mesozoischen

Amphineuren erhalten. Aus der Trias (Muschelkalk) nur ein Individuum der breitplattigen †Trachypleura triadomarchica Jäk., für die es leider nicht festzustellen ist, ob sie eine Eoplacophore oder bereits eine Mesoplacophore ist. Die sehr wenigen, zum Teil unvollständig erhaltenen, Zwischenplatten aus dem Lias Frankreichs und Siziliens und aus dem Dogger Frankreichs lassen sich nach den vorliegenden Beschreibungen wieder nicht sicher bestimmen. De Rochebrune faßte einen Teil als besondere Gattung †Pterygochiton auf; die Dinge zeigen Aehnlichkeiten sowohl mit Ischnochiton (Mesoplacophora) wie mit Chiton (Teleoplacophora). Aus dem oberen Jura und aus der Kreide fehlen Amphineuren bislang ganz.

Reichlicher sind dann wieder Funde aus dem Tertiär. Besonders im Eocän (Frankreich, Südaustralien und Victoria), dann im Oligocän (Frankreich, Mainzer Becken, Norddeutschland) ist eine größere Zahl von Arten gefunden worden, weniger im Miocän (Böhmen, Frankreich, Italien, Maryland). Etwas größer ist wieder die Zahl der pliocänen Arten aus Sizilien, Italien, Frankreich, England. Vereinzelt wurden auch Reste im Diluvium (Mittelmeergebiet, Eismeerküste, Westküste von Süd-Amerika) gefunden. Durchweg gehören die tertiären und diluvialen Arten zu heute noch lebenden Gattungen, und zwar sowohl zu den Eoplacophora (Lepidopleurus, Hanleya), als den Mesoplacophora (be-

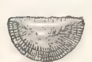



Fig. 3. Lepidopleurus †virgifer Sandb. sp. Zwischenplatte und hintere Endplatte, an letzterer sind die Gelenkfortsätze fortgebrochen. Natürliche Größe. Oligocän, Waldböckelheim bei Kreuznach. Aus Zittel.

sonders Ischnochiton Gray, Chaetopleura Shutlew., Acanthochites Gray, Plaxiphora Gray) und zu den Teleoplacophora (Chiton L., Trachyodon Dall, Lorica Ad., Loricella Pilsbry).

3. Systematik und Phylogenie. Ein konservativer Charakter zeichnet alle Polyplacophoren aus: die seit dem Untersilur gleichgebliebene Achtzahl der Rückenplatten.

Außer der zu allen Zeiten ausgesprochenen Scheidung in verschiedene Formen nach der Gestalt der Rückenplatten ist eine tiefergreifende Differenzierungsrichtung bemerkbar: die erst seit nachpaläozoischer Zeit festzustellende Ausbildung und Umgestaltung der Hafträ nder am Articulamentum. Dieses Moment hat nicht nur in systematischer Beziehung Wert gewonnen: Eo-, Meso-, Teleoplacophora und Unterscheidung von Gattungen (Dall, Carpenter, Pilsbry u. a. m.), sondern es ist auch in stammesgeschichtlicher Richtung verwertet worden: Eo-, Meso- und Teleoplacophora müßten nach Pilsbry je phyletische Einheiten sein, wie aus seinen Stammtafeln (1892) hervorgeht.

Die Ausbildung der Hafträ nder am Artikulament führt Pilsbry nach vergleichenden Beobachtungen an lebenden Formen auf Anpassungserscheinungen an das Leben in stark bewegtem Flachwasser zurück. Die meisten heute lebenden Formen sind Bewohner der nächsten Strandnähe, sie haben mehr oder weniger stark entwickelte Hafträ nder. Die in größeren Tiefen lebenden Plaxiphora simplex, Placophoropsis antiqua haben stark reduzierte Hafträ nder, die in größerer Tiefe lebenden Lepidopleurus-Arten entbehren der Hafträ nder. Solche Beobachtungen sind überzeugend. Folgerungen aus ihnen sind aber nicht uneingeschränkt auf die Gesamtheit der fossilen Formen zu übertragen. Die paläozoischen Gattungen entbehren durchweg der Hafträ nder, wären also nach Pilsbry Bewohner ruhigen Tiefenwassers gewesen? Kaum. Weder die untersilurischen Balaschichten mit †Helminthochiton im Girvangebiet Schottlands, noch die devonischen Korallenkalke des Ibergs im Harz, weder die unterkarbonen Sedimente Belgiens mit ihren verhältnismäßig sehr vielen Amphineuren, noch die Schichten des Oberkarbon Schlesiens mit †Pterochiton sind Tiefmeerbildungen. Man wird also die paläozoischen Eoplacophoren keineswegs durchweg als Bewohner des Tiefwassers ansprechen dürfen. Trifft das, wie höchst wahrscheinlich, zu, dann ist die Erwerbung von Hafträ ndern bei der Mehrzahl der jüngeren Polyplacophoren nicht allein der Ausdruck des Lebenswohnsitzes, sondern einer Entwickelungsrichtung, die durch den Wohnort nur mehr oder weniger beeinflußt werden kann. Sind dann Eo-, Meso- und Teleoplacophora wirklich nicht nur künstlich systematische Gruppen, sondern phyletische Einheiten?

Pilsbry nahm früher (1892) an, daß die „eoplacophoren" Lepidopleuriden mit paläozoischen Formen in Verbindung zu bringen seien, mit ihnen die Stammeseinheit „Eoplacophora" bildeten (als persistente Tiefwasserformen). Später (1900) hat er es ausgesprochen, daß keine der paläozoischen Formen die Grenze Perm-Trias überschritten habe, daß vielmehr ein Ersatz durch Meso- und Teleoplacophora stattgefunden habe. Woher dann die Lepidopleu-

ridae, und warum sie noch mit den paläozoischen Formen als Eoplacophora vereinigen? Ließe sich Pilsbrys andere Vermutung (1892), die Lepidopleuriden wären in bezug auf die Hafträndeｒ die reduzierten Abkömmlinge höher differenzierter Formen, beweisen, dann wäre es in stammesgeschichtlicher Beziehung ein Unding, die Lepidopleuriden mit den paläozoischen Formen als Eoplacophora zusammenzufassen. In seiner Stammtafel stellt Pilsbry (1892) die Lepidopleuriden als Wurzel der Ischnochitonidae und damit der ganzen Meso- und Teleoplacophora hin, das würde natürlich hinfällig. Nach Plate könnten die Lepidopleuriden und Ischnochitonidae (diese als Wurzel aller übrigen Gruppen) aus einer gemeinsamen Stammform entspringen.

Wie für einzelne Fälle die Rochebrune bereits andeutete, gibt es zwischen paläozoischen und känozoischen Polyplacophoren, wenn man von dem Besitz und der Ausbildung der Hafträndeｒ absieht, in den Rückenplatten, besonders in den Zwischenplatten eine ganze Anzahl von auffallenden Formgleichheiten. Nur einige seien hier hervorgehoben:

paläozoische „Eoplacophora"	känozoische „Eo-, Meso- und Teleoplacophora" (E. M. T.).
†Cymatochiton	Lepidopleurus (E.)
„	Chaetopleura (M.)
„	Chiton (T.)
†Pterochiton	Hemiarthrum (E.)
„	Acanthochites (M.)
„	Nuttallina (M.)
„	Acanthopleura (T.)
†Loricites	Lorica (T.)
†Gryphochiton	Hanleya (E.)

Sind das lediglich zusammenhanglose Konvergenzen oder handelt es sich um Formbeständigkeiten auf langen, bis ins Paläozoikum zu verfolgenden Linien? Letzteres scheint durchaus möglich. Dann wäre die Erwerbung und Differenzierung von Hafträndern auf mehreren getrennten Stammlinien vor sich gegangen, und Eo-, Meso und Teleoplacophora wären lediglich systematische — künstliche — Einheiten, wie alle auf die Hafträndeｒ basierten Systeme der Polyplacophoren. Beweise für die Fortführung paläozoischer Typen ins Känozoikum sind nicht zu liefern; das Polyplacophorenmaterial aus dem Mesozoikum ist leider allzu dürftig und zu ungenügend untersucht. Eines könnte gegen solche langen Stammlinien sprechen: die auffallende Größe der meisten paläozoischen Formen. Sie überschreiten in ihrem Rückenpanzer häufig die Länge von 10 cm, während die meistens jüngeren Formen sehr viel kleiner sind. Riesen pflegen nicht am Anfange von Stammreihen zu stehen. Aber wir kennen nicht alle paläozoischen Polyplacophoren, sondern sicherlich nur einen verschwindend kleinen Bruchteil von ihnen.

4. Zweifelhafte Formen. Immer,[1] mit Ausnahme weniger Mißbildungen, wird die Konstanz in der Zahl 8 der Rückenplatten bei den Polyplacophoren betont. J. J. Jahn glaubte dieses Gesetz erschüttert. Er beschrieb aus dem Unter-Silur Böhmens ein eigentümliches Fossil †Duslia insignis. Mindestens 11 (12 oder mehr?) Segmente setzen einen großen, breitelliptischen Panzer zusammen. Eine Endplatte ist sehr groß; die andere — sie ist nicht erhalten — müßte klein, schmal gewesen sein. In der Mediane verläuft ein Längswulst wie eine Trilobitenrhachis. Die Aequivalente der Lateropleuralflächen der meisten Segmente sind von der Achse winklig gegen vorn (?) gerichtet. Jahn glaubt einen mit Stacheln besetzt gewesenen Gürtel zu erkennen. In Duslia sieht er zusammen mit dem „Trilobiten" †Triopus draboviensis Barr. Chitoniden und findet Aehnlichkeiten mit Chiton magnificus Desh. und Chaetopleura peruviana Lam., doch beide Fossilien stehen allen bekannten Polyplacophoren ganz fremd gegenüber. Bei dem ungenügenden Erhaltungszustand ist sichere Entscheidung über ihre Stellung nicht zu fällen. Pilsbry sieht in †Duslia einen Crustaceen; Neumayr nannte †Triopus einen Xiphosuren. Man wird wohl Beziehungen zu letzteren in Betracht zu ziehen haben.

Literatur. ***A. T. de Rochebrune,*** *Monographie des espèces fossiles appartenant à la classe des Polyplaxiphores. Ann. d. Sc. géol., 1882, Bd. 4. Literatur bis 1882.* — ***L. G. de Koninck,*** *Faune de Calc. carbonif. d. l. Belgique, Teil 4. Ann. d. Mus. Roy. d'hist. nat. d. Belgique, Bd. 8, 1883.* — ***J. M. Clarke,*** *Die Fauna d. Iberger Kalkes. N. Jahrb. f. Min., 1883, B-Bd. 3.* — ***E. Ashby and M. G. Torr,*** *Fossil Polyplacophora from Eocene beds of Muddy Creek etc. Transact. a. Proceed. a. Rep. R. Soc. of South Australia, 1901, Bd. 25, Teil 2.* — ***O. Jaekel,*** *Ueb. e. n. Chitoniden, Trachypleura n. g. a. d. Muschelk. v. Rüdersdorf. Zeitschr. d. Deutsch. Geol. Ges., 1900.* — ***H. A. Pilsbry,*** *Amphineura. In Zittel-Eastman, Textbook of Palaeontology, 1900.* — ***F. R. Cowper Reed,*** *Crustacea etc. from Girvan. Geol. Mag., 1907, Dec. V, Bd. 5.* — ***Derselbe,*** *A new fossil from Girvan. Geol. Mag., 1911, Dec. V, Bd. 8.* — ***J. J. Jahn,*** *Duslia, e. n. Chitonidengattung a. d. böhm. Untersilur nebst einig. Bemerkungen üb. d. Gatt. Triopus Barr. Sitzungsb. d. Wiener Akad. d. Wiss., math.-naturw. Kl., 1893, Bd. 102, Abt. 1.*

J. F. Pompeckj.

Amphioxus.

Amphioxus lanceolatus Yarrel (Branchiostoma lanceolatum), das niederste Wirbeltier, das sowohl in den Grundzügen seines Baues als auch in den ersten Entwickelungsvorgängen manche ursprüngliche Charaktere der Wirbeltiere zeigt. Diese Tierform ist in stammesgeschichtlicher Hinsicht umso wichtiger, als man in bezug auf die Entstehung der Wirbeltiere aus Wirbellosen überhaupt nur wenige Anhaltspunkte besitzt, nämlich den Amphioxus und die Larven der Ascidien (vgl. den Artikel „Tunicata").

In diesem Sinne schrieb Haeckel (1868): „Wir müssen den Amphioxus als das ehrwürdige Tier betrachten, welches unter allen lebenden Tieren allein imstande ist, uns eine annähernde Vorstellung von unseren ältesten Wirbeltierahnen zu geben".

1. Erste Beschreibungen und Benennungen. Amphioxus lanceolatus wurde zuerst von Pallas im Jahre 1778 beschrieben. Dieser Forscher hielt das Tier für eine Nacktschnecke und gab ihm den Namen Limax lanceolatus. Es blieb dann lange unbeachtet, bis Costa im Jahre 1834 eine neue Beschreibung gab. Er erkannte, daß es ein fischartiges Wesen ist und gab ihm den Namen Branchiostoma lubricum. Bald darnach (1836) zeigte Yarrel, daß das Tier eine Rückensaite (Chorda dorsalis) besitzt, wie eine solche bei den Embryonen aller Wirbeltiere vorkommt; von ihm stammt der Name Amphioxus lanceolatus. Im Jahre 1839 erörterte Johannes Müller die Verwandtschaft mit den Wirbeltieren. Die Entwickelung des Tieres wurde 1867 von A. Kowalewsky beschrieben, welcher auch schon die merkwürdigen Beziehungen zu der Entwickelung der Tunicaten (Ascidien) erkannte.

Der Name Amphioxus ist so eingebürgert und durch mehr als sieben Jahrzehnte hindurch in der Literatur so oft verwendet, daß er nicht mehr verdrängt werden kann. Nach den neuen Nomenklaturregeln soll allerdings der ältere Name Branchiostoma an die Stelle des etwas neueren Namens Amphioxus treten, weshalb viele Autoren neuerdings jenen Namen verwenden.

2. Stellung im System. Um die Eigenartigkeit der Organisation in dem zoologischen System zum Ausdruck zu bringen, wurde der Amphioxus in eine besondere Klasse gestellt, welche Johannes Müller mit dem Namen Leptocardia (Röhrenherzen) bezeichnete, indem er das Fehlen des sonst bei allen Wirbeltieren vorhandenen Herzens in den Vordergrund stellte. Haeckel bezeichnete die Klasse als Acrania (Schädellose), da alle übrigen Wirbeltiere (Craniota) einen knorpeligen oder knöchernen Schädel besitzen. Ray Lankester führte den Namen Cephalochordata ein, indem er betonte, daß die Chorda bei Amphioxus bis zur vorderen Spitze des Kopfes geht, was bei den anderen Wirbeltieren infolge der Entwickelung des Gehirnes nicht mehr der Fall ist. Einige Systematiker wollen die Acrania von den Wirbeltieren abtrennen und stellen sie als besonderen Stamm zwischen die Tunicata und die Vertebrata.

3. Verwandte Arten. Es gibt einige Arten, die sich von Amphioxus lanceolatus hauptsächlich dadurch unterscheiden, daß die Gonaden nur auf der rechten Seite zur Entwickelung kommen; man hat diese Arten in einige neue Gattungen gestellt (Paramphioxus, Epigonichthys, Assymmetron, Heteropleura). Ferner wurde im atlantischen, pazifischen und indischen Ozean eine eigentümliche, pelagisch lebende Gattung in drei nahe miteinander verwandten Arten gefunden, die große Aehnlichkeit mit den Larven von Amphioxus lanceolatus besitzt und wie diese asymmetrisch gebaut ist (Mund auf der linken Seite, ohne Mundfühler; Gonaden nur rechts vorhanden; die Reihe der Kiemenspalten nur einseitig entwickelt und nach der Bauchseite verschoben). Diese Gattung wurde Amphioxides genannt. Sie kann als eine geschlechtsreif gewordene Larvenform aufgefaßt werden.

4. Größe und Aussehen. Amphioxus lanceolatus hat eine Länge von 5 bis 6 cm (selten mehr, bis 8 cm) und eine Breite von 7 bis 8 mm. Der Körper ist seitlich abgeflacht. Die Farbe ist im Leben weißlich, etwas durchscheinend, im konservierten Zustand weiß oder gelblichweiß. Der Körper ist zugespitzt an beiden Enden. Nahe am Vorderende, dessen Spitze zuweilen Rostrum genannt wird, liegt der Mund. Das letzte Drittel des Körpers, das hinter dem Atemporus liegt, verschmälert sich allmählich nach hinten. Am Hinterende sieht man eine Schwanzflosse, welche die Form einer Lanzenspitze hat (Fig. 1). Ein niedriger Flossensaum läuft median über den ganzen Rücken und verbreitert sich an der Schwanzflosse zu dem dorsalen Teil derselben; ventral geht ein ähnlicher Flossensaum von der Schwanzflosse bis an den Atemporus (Porus branchialis). Als Fortsetzungen des ventralen Flossensaumes können zwei seitliche

Hautfalten angesehen werden, die Seitenfalten oder Metapleuralfalten, die längs des Peribranchialraumes bis zum Mund nach vorn gehen (vgl. den Querschnitt Fig. 4). Zwischen den beiden Metapleuralfalten zeigt die Haut feine Längsfalten (Fig. 4).

branchialhöhle liegen die Gonaden (Hoden oder Eierstöcke). Die Muskulatur besteht aus zahlreichen regelmäßigen Abschnitten, den Myomeren, deren Reihe vom vorderen Ende bis zum hinteren Ende des Körpers reicht (Fig. 2). Amphioxus ist ferner charakterisiert durch das Fehlen

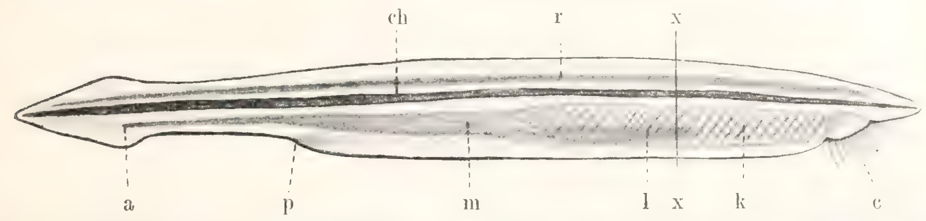


Fig. 1. Amphioxus lanceolatus (= Branchiostoma lanceolatum). Etwas schematisiert. c Mund mit Fühlfäden (Cirren); k Kiemenabschnitt des Darmkanals; l Leber; m Magen; a After; p Atemporus; ch Chorda; r Rückenmark; xx Lage des Querschnittes der Figur 4.

5. Vorkommen und Lebensweise. Das Tier lebt im Meer (im atlantischen Ozean, in der Nordsee, im Mittelmeer, an den Küsten von Amerika, Ostindien, Australien). In seiner normalen Stellung ist es nahezu senkrecht in den Sand eingegraben, so daß nur der Kopf mit dem Mund hervorsieht. Wird es beunruhigt, so zieht es sich in den Sand zurück. Nimmt man es aus dem Sand heraus, so schwimmt es nach Art eines Aales umher und gräbt sich wieder in den Sand ein. Es ist (infolge der Augenflecke im Rückenmark) fast in der ganzen Länge des Körpers lichtempfindlich und flieht das Licht.

6. Grundzüge der Organisation. Ein elastischer Stab, die Rückensaite (Chorda dorsalis) durchzieht den Körper vom vorderen bis zum hinteren Ende. Über diesem Stab liegt das Zentralnervensystem, also das Rückenmark und das Gehirnbläschen; letzteres ist nur durch eine Erweiterung des Zentralkanals des Rückenmarks charakterisiert. Unter der Chorda liegt das Darmrohr, bestehend aus einer Mundhöhle, einer Kiemendarmregion mit zahlreichen Kiemenspalten, einem Magenabschnitt mit einer schlauchartigen Leberanlage und einem Darm (Fig. 1). An der Mundöffnung bemerkt man zahlpaariger Gliedmaßen, Fehlen des Herzens und Fehlen eines knorpeligen oder knöchernen Skeletts (Schädel, Wirbel und Rippen).

7. Die Haut. Die Körperbedeckung wird von einem einfachen Epithel gebildet, das aus kubischen Zellen besteht und eine ziemlich dicke Cuticula an der Oberfläche abscheidet. Zwischen den gewöhnlichen Epithelzellen stehen Sinneszellen mit einem über die Oberfläche herausragenden kleinen Sinneshaar und einem feinen Fortsatz an der Basis, welcher mit dem Nervensystem in Verbindung tritt. Manche Autoren geben an, daß das Epithel auf einer dicken Basalmembran aufruht; diese ist aber wahrscheinlich bindegewebiger Natur und der Stützsubstanz zuzurechnen. Durch das einschichtige Körperepithel gleicht Amphioxus den wirbellosen Tieren und unterscheidet sich von den sämtlichen übrigen Wirbeltieren, die alle ein geschichtetes Epithel als Epidermis besitzen.

8. Der Darmkanal. Am Eingang in den Mund stehen die Fühlfäden (Cirren). Es gibt deren jederseits 12 bis 15, manchmal mehr bis zu 20. Diese sind an ihrer Innen-

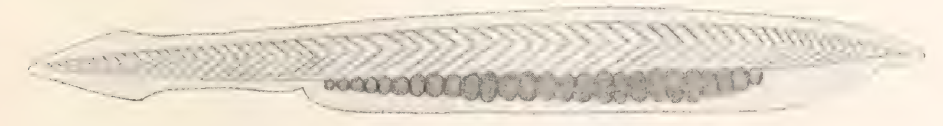


Fig. 2. Die segmentalen Muskeln (Myomeren) und die Gonaden des Amphioxus.

reiche Fühlfäden (Cirren). Die Kiemenregion ist von einer Höhle umgeben, in welche das Atemwasser durch die Kiemenspalten übertritt, die Peribranchialhöhle, die durch den Atemporus (Porus branchialis oder Spiraculum) ausmündet. An der äußeren Wand der Peri-

seite mit einem Flimmerepithel bekleidet, während sich an ihrer Außenseite kleine Papillen mit Sinneszellen befinden. Im Innern jedes Fühlfadens liegt ein stützender Stab. Die oberen Teile dieser Stützstäbe vereinigen sich zu einem Ring, der den Mund umgibt. Die Mundhöhle ist mit Flimmerepithel aus-

gekleidet. An ihrer Wand bemerkt man einige fingerförmige Streifen, die durch besonders hohes Flimmerepithel gebildet sind. Der Mund ist durch eine Einschnürung, in der sich ein Ringmuskel befindet, von der Kiemenregion abgesetzt; an dieser Stelle ragt eine Ringfalte vor, welche gewöhnlich trichterförmig in den Kiemenraum hineinragt; sie wird als Velum bezeichnet; sie ist am Rande mit kleinen Fortsätzen (Tentakeln) versehen.

Die Kiemenregion, die von manchen Forschern Pharynx genannt wird, ist durch die sehr zahlreichen schiefstehenden Kiemenspalten gekennzeichnet. Man zählt etwa 180 Spalten auf jeder Seite. Achtet man auf den feineren Bau der zwischen den Spalten gelegenen Bögen und berücksichtigt man die Entwickelung, so ergibt sich, daß immer 2 Spalten zusammengehören und zusammen eine primäre Kiemenspalte darstellen, welche durch Entstehung einer mitten durch gehenden Zunge in 2 sekundäre Kiemenspalten zerlegt wird. Man unterscheidet also primäre Kiemenbögen oder Septen, die die primären Kiemenspalten trennen, und sekundäre Kiemenbögen oder Zungenbalken. Die primären Kiemenbögen sind durch zarte Querbrücken (Synaptikel) verbunden, welche mit den Zungenbalken an der Innenseite derselben verschmolzen sind (Fig. 3).

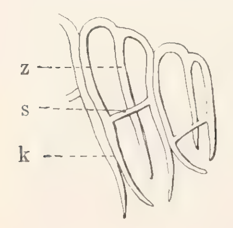


Fig. 3. Skelet der Kiemenbögen am Ende des Kiemenkorbes. Nach Spengel. k die beiden verschmelzenden Stäbe im primären Kiemenbogen, z Zungenbalken, s Synaptikel.

Jeder primäre Kiemenbogen enthält einen Cölomkanal, der an seiner lateralen Seite verläuft und ventral mit dem Cölom des Endostyls, dorsal mit dem Körpercölom zusammenhängt. Die Zungenbalken enthalten keinen Cölomkanal. Jeder primäre Kiemenbogen wird von einem Skeletstab durchzogen, der aus der Verschmelzung zweier Stäbe hervorgegangen ist, daher ventral in zwei Spitzen ausläuft. In jedem Zungenbalken liegt ebenfalls ein Skeletstab; dieser ist an seinem dorsalen Ende mit den beiden benachbarten Stäben der primären Kiemenbögen so verbunden, daß die Figur einer dreizinkigen Gabel entsteht (Fig. 3). In jedem Kiemenbogen verläuft ein Blutgefäß an der lateralen Seite und eines an der medialen Seite; diese Gefäße münden in die Aortenwurzeln, die neben der Epibranchialrinne verlaufen. Die Kiemenbögen tragen Flimmerepithel.

In der Medianebene geht durch die ganze Kiemenregion an der Dorsalseite des Kiemenraumes eine Rinne, die Epibranchialrinne, und an der Ventralseite desselben ebenfalls eine Rinne, die Hypobranchialrinne, die dem Endostyl der Tunicaten entspricht (Fig. 4). Am Vorderende des Kiemenraumes direkt hinter dem Velum führt jederseits ein Flimmerbogen von jener Rinne zu dieser. Die Epibranchialrinne besitzt ein Flimmerepithel mit großen Wimpern. Die Hypobranchialrinne hat ebenfalls Flimmerepithel, aber außerdem noch 4 Streifen von Drüsenzellen. Sie ist für die Ernährung des Tieres wichtig, da die feinen Nahrungsteilchen durch die Absonderung der Drüsenzellen verklebt und durch die Tätigkeit der Flimmerzellen kontinuierlich in den Magen hineingeschoben werden.

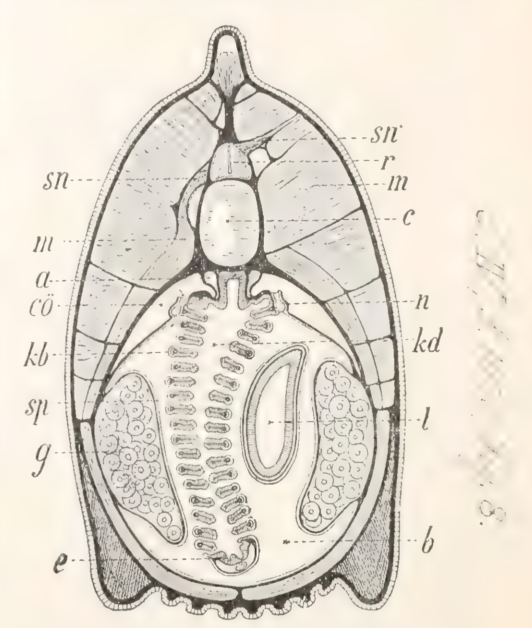


Fig. 4. Querschnitt durch die Kiemenregion (vgl. Fig. 1). Nach Ray Lankester und Boveri. r Rückenmark; sn Nervenwurzel; m Muskeln; c Chorda; a Aortenwurzel; cö Cölom der Kiemenregion; n Nierenkanälchen; kd Kiemendarm; kb Kiemenbogen; b Peribranchialraum; sp Kiemenspalte; g Gonade; l Leberschlauch; e Hypobranchialrinne.

Als Magen kann man denjenigen Teil des Darmkanales bezeichnen, welcher auf die Kiemenregion folgt, und von dem der blindsackartige Leberschlauch ausgeht, obgleich dieser Magenteil von dem folgenden Darme nicht deutlich abgesetzt ist. Dieser Abschnitt hat eine grünliche Färbung, da sich Sekretkörnchen von dieser Farbe in den Epithelzellen befinden. Der Leberschlauch liegt rechts neben dem Kiemenkorb; er besitzt dasselbe Epithel wie der Magen. Der Magen und der Darm haben eine Flimmerung, da die einzelnen Zellen jeweils eine Cilie tragen. Der After

liegt an der Schwanzflosse, nicht weit vom Hinterende, asymmetrisch auf der linken Seite (Fig. 1).

9. **Die Peribranchialhöhle.** Die Kiemenregion des Darmkanals ist von der Peribranchialhöhle umgeben, in welche das Wasser durch die Kiemenspalten eintritt, um durch den Porus branchialis auszufließen. Dieser Raum ist durch eine Überwölbung entstanden und kann also theoretisch auf eine Einstülpung der äußeren Haut zurückgeführt werden. Das Epithel ist ein Flimmerepithel. An der äußeren Wand dieses Raumes liegen die Gonaden, welche aber von den Myotomen abzuleiten sind und deshalb weiter unten besprochen werden.

10. **Die Muskulatur.** Da paarige Gliedmaßen fehlen, ist die Muskulatur vom Vorderende bis zum Hinterende sehr gleichförmig. Man bemerkt eine große Zahl (62) Muskelsegmente (Myomeren), deren jedes V-förmig geknickt ist, wie ja auch bei Fischen eine entsprechende Knickung der Muskelsegmente besteht. Indem sich diese Segmente sukzessive von vorn nach hinten kontrahieren, kommt die schlängelnde Bewegung zustande, mittels deren das Tier schwimmt oder sich eingräbt.

11. **Das Nervensystem.** Durch das Rückenmark geht ein enger Zentralkanal, an den sich dorsalwärts ein durchgehender Spalt anschließt; wie das Rückenmark durch Einstülpung entstanden ist, so zeigt es auch dauernd das Bild einer Einfaltung. Am vorderen Ende des Rückenmarkes ist der Zentralkanal blasenartig erweitert; hier liegt das kleine Gehirnbläschen, welches wahrscheinlich dem ursprünglichen Vorderhirn (d. h. dem Großhirn und dem Zwischenhirn) der anderen Wirbeltiere entspricht. Das Bläschen hat eine dünnere Wand als das Rückenmark. Es läuft nach vorn in eine Spitze aus, die bei jungen Exemplaren noch mit der sogenannten Riechgrube in Verbindung steht, und dem vorderen Neuroporus entspricht (s. den vorderen Neuroporus an Fig. 7 und 8).

Die Spinalnerven treten in segmentaler Anordnung aus dem Rückenmark aus. Zu jedem Myomer geht eine aus vielen Fasern bestehende ventrale Wurzel von ausschließlich motorischem Charakter. Ihr entspricht jeweils eine dorsale Wurzel, welche sich weder mit der ventralen verbindet noch ein Spinalganglion bildet, sondern direkt an der Grenze zweier Myomeren zwischen denselben hindurchtritt und sich in einen dorsalen und einen ventralen Ast teilt. Der erste geht zur Haut und ist sensibel, der letzte geht teils zur Haut, teils zu Muskeln der ventralen Körperhälfte, der Kiemenbögen und des Darmes, hat also teils sensiblen, teils motorischen Charakter. Das erste Myomer[1]) wird von dem 3. Spinalnervenpaar versorgt. Der erste und der zweite Spinalnerv haben nur die dorsale Wurzel, sind hauptsächlich sensibler Natur und endigen am Rostrum mit kleinen Gruppen von „Ganglienzellen", die man vielleicht als Sinneszellen ansehen darf.

[1]) Nach Hatschek (1892) liegt vor diesem 1. Myomer noch ein rudimentäres Myomer.

12. **Die Sinnesorgane.** Sinneszellen, welche in der Haut verteilt sind, wurden oben schon erwähnt. Gruppen von Sinneszellen (Sinnesknospen) findet man an der Außenseite der Mundcirren und auf dem Velum. Als Lichtsinnesorgane gelten folgende Organe: eine Gruppe pigmentierter Zellen in der vorderen Wand des Gehirnbläschens („Auge") und zahlreiche im Verlauf des Rückenmarks verteilte Augenflecke, die je aus einer Sinneszelle und einem Pigmentbecher bestehen. Als Riechgrube wird eine kleine trichterförmige Grube bezeichnet, welche auf der linken Seite des Kopfes am Vorderende des Gehirns gelegen und mit Flimmerepithel ausgekleidet ist; sie entspricht der Stelle des embryonalen vorderen Neuroporus. Als Sinnesorgan ist vermutlich auch eine kleine flimmernde Grube am Dach der Mundhöhle (Hatschek sche Grube) anzusehen.

13. **Blut und Gefäßsystem.** Das Blut des Amphioxus ist farblos und enthält nur sehr wenige Blutkörperchen; diese haben den Charakter von Leukocyten. Rote Blutkörperchen fehlen.

Ein beutelförmiges Herz, wie es allen übrigen Wirbeltieren zukommt, ist bei Amphioxus nicht vorhanden. Das Blutgefäßsystem zeigt aber doch in seiner Anordnung manche Ähnlichkeit mit dem der Wirbeltierembryonen. Von einem ventral gelegenen und unter der Hypobranchialrinne verlaufenden Gefäß, der Kiemenarterie (Arteria branchialis) gehen die Gefäße der Kiemenbögen ab. Diese Kiemenarterie ist kontraktil. An den Gefäßen, welche von ihr zu den primären Kiemenbögen (Septen) gehen, befinden sich blasenartige Erweiterungen (Bulbilli), die ebenfalls kontraktil sind. Das Blut, welches durch die Gefäße der Kiemenbögen hindurchgegangen ist, sammelt sich in den beiden Aortenwurzeln, die rechts und links neben der Epibranchialrinne liegen. Sie entsenden nach vorn Carotiden in die Kopfregion. Am Ende der Kiemenregion vereinigen sich die beiden Aortenwurzeln zu einer Aorta (Aorta abdominalis), die offenbar der Aorta descendens der anderen Wirbeltiere entspricht. Das Blut geht aus der Aorta großenteils zum Darmkanal und sammelt sich unter dem Darm in einer Vena subintestinalis. Diese löst sich an der Leber in ein Kapillarnetz auf; das Blut sammelt sich dann wieder in einer Lebervene und gelangt so in die obengenannte Kiemenarterie.

An der Stelle, wo die Lebervene in die Kiemenarterie umbiegt, nimmt sie jederseits noch eine

Vene auf; diese beiden Gefäße heißen Ductus Cuvieri, und man homologisiert sie mit den gleichnamigen Venen der Embryonen der cranioten Wirbeltiere. Sie führen das Blut aus den Cardinalvenen (Venae cardinales) zurück; diese liegen auf der Höhe der Gonaden und geben Kapillarnetze ab, welche die Gonaden versorgen. Die Cardinalvenen erhalten ihr Blut teils aus einer kleinen Schwanzvene, teils aus kleinen Gefäßen, die von der Aorta aus in die Muskelsepten (Myosepta) eintreten. Hinter den beiden Ductus Cuvieri liegen noch einige ganz ähnlich verlaufende Gefäße in mehreren Segmenten (Quervenen); diese führen von den Cardinalvenen zu einem Lakunensystem, das an der äußeren Wand des Cöloms sich hinzieht (Parietallakunensystem) und ebenfalls in die Lebervene mündet (nach B. Zarnik 1904).

14. Das Cölom. In ähnlicher Weise wie bei den anderen Wirbeltieren ist der Darmkanal von einer Leibeshöhle (Cölom) umgeben. In der Kiemenregion ist die Leibeshöhle nur durch folgende Räume vertreten: jederseits durch einen streifenförmigen Raum dorsal von der Peribranchialhöhle (Fig. 4), ferner durch einen unpaaren Raum unter der Hypobranchialrinne und durch die kanalartigen Räume in den primären Kiemenbögen, welche von jenen Räumen zu diesem gehen, sowie durch einen schmalen Cölomraum im Umkreis des Leberschlauches.

15. Der Exkretionsapparat. In der Kiemenregion liegen die von Boveri entdeckten Exkretionsorgane. Es sind branchiomer angeordnete Kanälchen, jederseits etwa 90, welche jeweils über den sekundären Kiemenbögen (Zungenbalken) liegen; sie führen vom Cölom in den Peribranchialraum. Sie haben eine bogenförmige Gestalt und münden jeweils

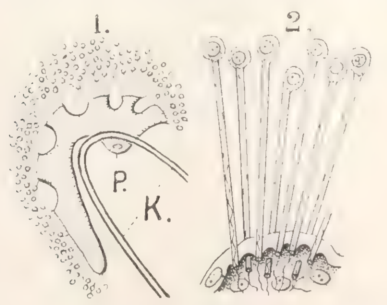


Fig. 5. Nierenkanälchen von Amphioxus. 1. Ganzes Kanälchen mit mehreren Nephrostomen und ansitzenden Büscheln von Solenocyten. P Mündung in den Peribranchialraum; K Schnittrand einer primären Kiemenspalte. Nach Boveri aus R. Hertwig Lehrbuch. 2. Solenocyten am Rand eines Nephrostoms stärker vergrößert. Nach Goodrich aus R. Hertwigs Lehrbuch.

am oberen Ende des Zungenbalkens in den Peribranchialraum (die Atrialhöhle. Fig. 5). Sie besitzen mehrere Flimmertrichter (Nephrostome), so daß sie geeignet sind, Flüssigkeit aus der Leibeshöhle nach außen zu leiten und folglich sowohl an die offenen Segmentalorgane vieler Anneliden als auch an die Vornierenkanälchen und Urnierenkanälchen der cranioten Wirbeltiere erinnern. Am Rande dieser Flimmertrichter sitzen aber auch zahlreiche röhrenartige, lange Zellen an (von Boveri Fadenzellen genannt), welche einen langen feinen Kanal mit einer darin schlagenden Geißel enthalten und so völlig den Solenocyten gleichen, wie sie an den Protonephridien vieler niederer Würmer und auch an den Segmentalorganen mancher Anneliden vorkommen (Fig. 5, 2). Die Wand des Nierenkanälchens besteht aus einem Flimmerepithel, das insbesondere an der Ausmündungsstelle lange Cilien trägt. Die Blutgefäße der primären Kiemenbögen lösen sich an den Nierenkanälchen zu einem Kapillarnetz auf, so daß auch aus dem Blut eine Ausscheidung möglich ist.

Außer den Nierenkanälchen werden von manchen Forschern noch folgende Bildungen als Exkretionsorgane angesehen. Am Boden des Peribranchialraumes (hauptsächlich in der Nähe des Porus branchialis) findet man jederseits zahlreiche Stellen, an welchen das Epithel stark verdickt ist und Drüsenzellen mit Sekretkörnchen enthält, so daß man eine exkretorische Funktion vermuten kann. Auch können bei den Exkretionsorganen beiläufig die merkwürdigen röhrenförmigen Fortsätze erwähnt werden, welche nahe am hinteren Ende der Kiemenregion von der Pericardialhöhle aus in das Cölom hineinragen und in der Gegend des 27. Myotoms enden (vermutlich mit einer Oeffnung versehen); es gibt jederseits einen solchen Atrio-Cölom-Trichter.

16. Bindegewebe und Skeletteile. Ueber die histologische Natur der bindegewebigen Bestandteile und der Stützsubstanz gehen die Meinungen der Forscher auseinander, da diese Gewebsteile arm an Zellen sind. Unter dem Hautepithel sieht man eine faserige Membran ohne Zellkerne, welche von manchen Autoren als Basalmembran des Epithels, von anderen als bindegewebige Membran betrachtet wird. Darunter folgt eine gallertige Schicht, welche bald dick, bald dünn ist und von vereinzelten Bindegewebsfaserzügen und Nerven durchzogen wird. Man findet in ihr vereinzelte Zellen vom Charakter von Mesenchymzellen; solche verästelte Mesenchymzellen liegen reichlicher an ihrer Peripherie unter der erwähnten Basalmembran.[1]) Die vordere und die hintere Körperspitze wird unter und über der Chorda von einem System kernhaltiger Bindegewebszüge gestützt. Eine besonders feste, aber zellenarme Gallerte bildet das sogenannte Skelet, zu welchem hauptsächlich folgende Teile gehören: das erwähnte Stützskelet der Fühlfäden am Mund, das oben besprochene Skelet der Kiemenbögen, die dünnen Scheidewände zwischen den

[1]) R. Goldschmidt Das Bindegewebe der Amphioxus, Sitzber. d. Ges. f. Morph. und Phys. zu München 1908.

Myomeren der Muskulatur, eine ziemlich dicke Hülle in der Umgebung der Chorda dorsalis und des Rückenmarks (vergleichbar dem skeletogenen Gewebe anderer Wirbeltiere) sowie davon ausgehende strahlenartige Fortsätze, welche in den Flossensaum eintreten.

17. Der Geschlechtsapparat. Amphioxus ist getrenntgeschlechtlich, aber die Männchen sind äußerlich kaum von den Weibchen zu unterscheiden. Die Hoden sind den Eierstöcken sehr ähnlich; in beiden Fällen sieht man eine Anzahl von Geschlechtsdrüsen (Gonaden) jederseits in der Kiemenregion an der Wand des Peribranchialraumes gelegen und in diesen Raum sich vorwölbend (Fig. 4); sie beginnen im 9. bis 11. Segment; gewöhnlich beträgt die Zahl jederseits 26, aber die äußersten sind oft nur schwach entwickelt (Fig. 2).

Die Gonaden sind segmental gelegen und entsprechen den Myomeren; diese Lagebeziehung erklärt sich aus der Entwickelungsgeschichte, denn die Gonaden entstehen aus den ventralen Enden der Myotome. Die Gonaden entleeren sich durch einen Durchbruch in die Peribranchialhöhle. Diese Entleerungsweise ist wahrscheinlich nicht ursprünglich; denn die Höhlen der Gonaden stellen sich entwickelungsgeschichtlich als Teile der Ursegmente dar, so daß die Geschlechtsprodukte ursprünglich ihren Ausweg durch das Cölom und die Nierenkanälchen oder den Atrio-Cölom-Kanal nehmen konnten.

18. Die Entwickelung. Das Laichen findet an warmen Tagen gegen Abend statt. Die Eier werden stoßweise in Form weißer Wölkchen durch den Branchialporus entleert. Die Männchen stoßen gleichzeitig in derselben Weise den Samen aus. Sobald eine Samenzelle in die Eizelle eingedrungen ist, hebt sich von dem Ei die Membran ab, wodurch anderen Samenzellen der Eingang verwehrt ist. Die Eizelle hat eine Größe von 0,1 bis 0,13 mm

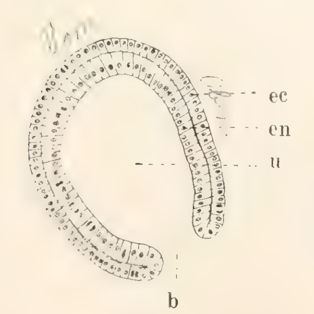


Fig. 6. Gastrula des Amphioxus. Nach Sobotta. b Blastoporus (Urmund), u Urdarm, ec Ektoderm, en Entoderm. Die abgeflachte Seite ist die Dorsalseite (Rückenseite).

und enthält wenig Nahrungsdotter. Der erste Richtungskörper wird noch im Eierstock ausgestoßen, der zweite kurz nach der Besamung des Eies. Sobald die Befruchtung vollzogen ist, also der männliche Kern sich mit dem weiblichen vereinigt hat, beginnt die Furchung. Diese ist nahezu äqual, d. h. die Furchungszellen sind nahezu von gleicher Größe. Daher besteht auch die Blastula aus Zellen von nahezu gleicher Größe; jedoch ist der vegetative Pol durch etwas größere Zellen kenntlich, und diese werden bei der nun folgenden Gastrulation eingestülpt. Es entsteht eine typische Gastrula mit weiter Urdarmhöhle (Fig. 6). Die Zellen des Ektoderms entwickeln schon jetzt jeweils eine Geißel, so daß die Embryonen in der Eihülle zu rotieren beginnen und später nach dem Verlassen der Eihüllen davonschwimmen können.

An der Gastrula wird durch eine Abflachung die Rückenseite des Embryo kenntlich, und hier grenzt sich ein länglicher Streifen des Ektoderms (die Medullarplatte) von dem anstoßenden Ektoderm ab und wird von diesem überwachsen. Die Medullarplatte, welche auf diese Weise in die Tiefe gesunken ist, faltet sich nun ein, um das Medullarrohr zu bilden, welches vorn eine Oeffnung hat (den vorderen Neuroporus) und hinten in den Urmund (die Mündung des Urdarmes) mündet. Diese Verbindung des Rückenmarksrohres mit dem Darmrohr wird Canalis neurentericus genannt (Fig. 7). Das mittlere

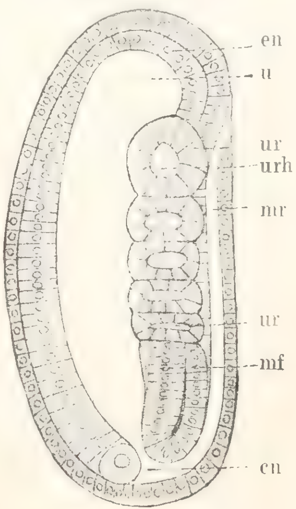


Fig. 7. Larve des Amphioxus mit 5 Ursegmenten. Nach Hatschek. en Entoderm, u Urdarm, ur Ursegment, urh Ursegmenthöhle, mr Medullarrohr (Rückenmarksrohr), mf Mesodermfalte, cn Canalis neurentericus.

Keimblatt (Mesoderm) entwickelt sich von dem inneren Keimblatt aus in folgender Weise: während ein mittlerer Streifen des Entoderms unter dem Medullarrohr durch Faltung die Anlage der Rückensaite (Chorda dorsalis) bildet, entsteht neben ihr jederseits eine Längsfalte des Entoderms, die von vorn nach hinten durch Querfalten in kästchenförmige Abschnitte, die Ursegmente, zerlegt wird (Abbildungen in dem Artikel „Leibeshöhle"). Jedes Ursegment enthält einen Hohlraum, der gemäß der eben beschriebenen Entstehung ursprünglich mit der Urdarmhöhle zusammenhängt, aber dann von ihr abgetrennt wird. Figur 7 zeigt einen Embryo, an dem schon 5 Ursegmente und hinter diesen noch die ungeteilte Mesodermfalte zu sehen sind. Die Ursegmente, deren Zahl noch lange Zeit zunimmt, wachsen an den Seiten des Körpers herab

und gliedern sich in folgende Teile: Der größte Teil jedes Ursegments bildet das Muskelsegment oder Myotom, ein kleinerer unterer Teil verschmilzt mit den entsprechenden Teilen der benachbarten Ursegmente, durch welche Verschmelzung jederseits der langgestreckte einheitliche Hohlraum des Cöloms entsteht. Aus dem untersten Teile des Myotoms geht jeweils eine Gonade hervor. Die Anlage der Gonade, welche am unteren Ende eines Myotoms entsteht, stülpt sich in den untersten Teil der Myotomhöhle des vorhergehenden Segmentes ein und wird so von einem Hohlraum umgeben, der sich von dem vorhergehenden Myotom völlig abtrennt und Genitalkammer genannt wird.

Die freischwimmende Larve des Amphioxus ist asymmetrisch gebaut, was wahrscheinlich mit der Art der Bewegung zusammenhängt, da sie sich beim Vorwärtsschwimmen fortwährend nach links dreht. Der Mund liegt links, die linke Reihe der Kiemenspalten

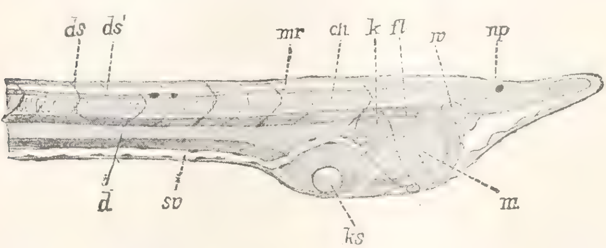


Fig. 8. Vorderende einer älteren Larve von rechts gesehen. Nach Hatschek aus Korschelt und Heider Lehrbuch. ds u. ds' Grenzlinien der Muskelsegmente der rechten und der linken Seite, mr Medullarrohr, ch Chorda, k kolbenförmige Drüse (Bedeutung unbekannt), fl. Flimmerstreifen (Anlage der Hypobranchialrinne), w Wimperorgan, np vorderer Neuroporus, d Darm, sv Subintestinalvene (rechts gelegen), m Mund (links gelegen).

entsteht früher als die rechte und nimmt ihren Ursprung auf der rechten Seite, so daß sie nach links hinüberwandern muß (Fig. 8). Die Larve sinkt zu Boden und liegt auf der rechten Seite, so daß der Mund nach oben sieht. Wenn das Tier dann zu der definitiven Lebensweise übergeht und sich in den Sand eingräbt, wird der Bau symmetrisch.

Literatur. ***Th. Boveri,*** *Die Nierenkanälchen des Amphioxus. Zoolog. Jahrb. Bd. 5 1892.* — ***Derselbe,*** *Ueber die Bildungsstätte der Geschlechtsdrüsen beim Amphioxus. Anat. Anzeiger Bd. 7 1892.* — ***E. Burchardt,*** *Beiträge zur Kenntnis des Amphioxus. Jenaische Zeitschrift Bd. 34 1900 (Mit Literaturverzeichnis).* — ***P. Cerfontaine,*** *Recherches sur le développement de l'Amphioxus. Arch. de Biologie vol. 22, 1906.* — ***Delage et Hérouard,*** *Traité de Zoologie concrète. Les Procordés. Paris 1898 (Beste Zusammenfassung).* — ***A. S. Dogiel,*** *Das periphere Nervensystem des Amphioxus. Anat. Hefte Nr. 66 1903.* — ***R. Goldschmidt,*** *Amphioxides. Wiss. Ergebnisse d. Valdivia-Expediton. Bd. 12 1905.* — ***B. Hatschek,*** *Studien über die Entwickelung des Amphioxus. Arb. aus d. zool. Inst. Wien Bd. 4 1881.* — ***Derselbe,*** *Ueber den Schichtenbau des Amphioxus. Anatom. Anzeiger Bd. 3 1888.* — ***Derselbe,*** *Die Metamerie des Amphioxus und des Ammoroetes. Verhandl. d. Anat. Ges. 1892.* — ***R. Hesse,*** *Die Sehorgane des Amphioxus. Zeitschr. f. wiss. Zool. Bd. 63 1898.* — ***J. F. Heymans et O. van der Stricht,*** *Sur le système nerveux de l'Amphioxus. Mém. cour. de l'Acad. R. de Belgique T. 61 1896.* — ***A. Kowalevski,*** *Entwickelungsgeschichte von Amphioxus lanceolatus. Mém. Akad. St. Pétersbourg 1867.* — ***Derselbe,*** *Weitere Studien über die Entwickelungsgeschichte des Amphioxus. Archiv f. mikr. Anat. Bd. 13 1877.* — ***Joh. Müller,*** *Ueber den Bau und die Lebenserscheinungen des Branchiostoma lubricum (Amphioxus lanceolatus). Abhandl. d. Berliner Akad. 1842.* — ***E. Ray Lankester,*** *Contributions to the Knowledge of Amphioxus lanceolatus. Quart Journal of micr. Sc. Bd. 29 1889.* — ***E. Ray Lankester und A. Willey,*** *The development of the atrial chamber of Amphioxus Ebenda Bd. 31. 1890.* — ***R. Legros,*** *Contribution à l'étude de l'appareil vasculaire de l'Amphioxus. Mitth. aus der zoolog Station zu Neapel 15. Bd. 1902.* — ***A. Leiber,*** *Bau und Entwickelung der weibl. Geschlechtsorgane des Amphioxus. Zoolog. Jahrb. Bd. 18 1903.* — ***S. Sobotta,*** *Die Reifung und Befruchtung des Eies von Amphioxus lanceolatus. Arch. f. mikr. Anat. Bd. 50. 1897.* — ***J. W. Spengel,*** *Beitrag zur Kenntnis der Kiemen des Amphioxus. Zoolog. Jahrbücher Bd. 4. 1890.* — ***O. van der Stricht,*** *La maturation et la fécondation de l'oeuf d'Amphioxus lanceolatus. Bull. de l'Ac. R. de Belgique 3 Série. Bd. 30 1895.* — ***S. W. van Wijhe,*** *Beiträge zur Anatomie der Kopfregion des Amphioxus. Peter Camper Deel 1 1901.* — ***Derselbe,*** *Die Homologisierung des Mundes des Amphioxus. Peter Camper Deel 6 1906.* — ***A. Willey,*** *The later larval development of Amphioxus. Quart. Journal. of micr. Sc. Bd. 32. 1891.* — ***B. Zarnik,*** *Ueber die Geschlechtsorgane des Amphioxus. Zoolog. Jahrbücher Bd. 21. 1904.* — ***Derselbe,*** *Ueber segmentale Venen bei Amphioxus und ihr Verhältnis zum Ductus Cuvieri. Anat. Anzeiger Bd. 24 1904.*

H. E. Ziegler.

Analyse
Organische Analyse

siehe den Artikel „Chemische Analyse".

Analyse
Gasanalyse

siehe den Artikel „Chemische Gasanalyse".

Analyse
Mikrochemische Analyse

siehe den Artikel „Chemische Analyse".

Andrews

Thomas.

Geboren am 19. Dezember 1813 in Belfast; gestorben am 26. November 1885 daselbst. Er studierte in Glasgow, war zunächst praktischer Arzt, später Professor der Chemie am Queens College in Belfast, zu dessen Vizepräsident er 1845 ernannt wurde, trat 1879 aus Gesundheitsrücksichten zurück. Seine Arbeiten bewegen sich meist auf dem Grenzgebiet zwischen Physik und Chemie, die bekanntesten handeln über die Wärmeentwickelung bei chemischen Prozessen, über den Verbrennungsprozeß. In den sechziger Jahren fand Andrews das Gesetz, daß Kohlensäure und andere Gase sich oberhalb einer gewissen, der „kritischen Temperatur", nicht mehr durch Druck verflüssigen lassen.

Literatur. *Memoir von Professor **Tait** und Professor **Crum Brown** in Andrews Gesammelten Werken 1889.*

E. Drude.

Angiospermen.

Bedecktsamige Pflanzen.

I. Einleitung. II. Die Blüten der Angiospermen. III. Die Familien der Angiospermen: 1. Klasse Monocotyledoneae. 2. Klasse Dicotyledoneae: a) Unterklasse Archichlamydeae; b) Sympetalae.

I. Einleitung. In der folgenden Uebersicht über die Angiospermen sind vorzugsweise die Familien und die sie zusammenfassenden Reihen charakterisiert worden; ein weiteres Eingehen auf die Gattungen und die Arten verbietet der geringe Umfang der hier zur Verfügung steht. Von den Arten sind nur die wichtigsten hervorgehoben worden, d. h. solche, die für das System besondere Bedeutung haben oder die durch ihren Nutzen für den menschlichen Haushalt oder ihre allgemeine Verbreitung von Interesse sind. Ueber die einzelnen Nutzpflanzen, die hier in der ihnen im System zukommenden Stellung aufgeführt werden, wird man an anderer Stelle ausführlichere Angaben finden.

Das System, dem ich in fast allen Punkten gefolgt bin, ist das Englersche, wie es besonders in der neuesten Auflage des „Syllabus der Pflanzenfamilien" (Berlin 1909) niedergelegt ist. Gewiß wird man über die Stellung mancher Gruppen verschiedener Meinung sein können; wenn es hier aber an Gelegenheit fehlt, diese Meinungsverschiedenheiten in eingehender Weise zu diskutieren, so wird es am besten sein, einem heute in weiten Kreisen anerkannten System zu folgen, das als dem Stande unseres heutigen systematischen Wissens entsprechend bezeichnet werden kann.

Nomenklatur. Die Benennung der Pflanzenarten sowie der anderen Kategorien geht in den Grundzügen auf die Nomenklatur zurück, die Linné, die systematischen Ergebnisse seiner Vorgänger zusammenfassend und reformierend, geschaffen hat. Allmählich entstand aus mannigfachen Gründen eine ziemliche Verwirrung in den Pflanzennamen; z. B. ist eine Gattung zweimal beschrieben worden, der jüngere Name hat sich eingebürgert, bis ein Monograph den älteren Namen wieder aufnimmt und zur Geltung bringt, während der gebräuchliche Name von Gärtnern u. a. weiter angewendet wird; oder bei Ueberführung einer Art, die bisher in einer falschen Gattung stand, in die richtige Gattung wird die Benennung der Art verschieden gehandhabt. Einzelne Botaniker hielten sich nicht an die Gattungsnamen Linnés, sondern gingen weiter zurück, sogar bis auf die klassischen Autoren des Altertums. Gewiß ist die Art und Weise der Benennung vom wissenschaftlichen Standpunkte aus gleichgültig, die Nomenklatur ist im Grunde nur ein Mittel zur Verständigung, aber als solches ist sie von größter praktischer Bedeutung. Nach verschiedenen Versuchen zur Schaffung einer einheitlichen Nomenklatur wurde die Frage durch einen internationalen Kongreß in Wien 1905 geregelt. Bei der Benennung ist danach das historische Prinzip maßgebend; im allgemeinen ist stets der älteste Name, dem eine ausreichende Charakteristik beigegeben war, zu gebrauchen. Den Ausgangspunkt für die Benennung von Gattungen und Arten bildet das Jahr 1753, in dem die „Species plantarum" von Linné erschienen. Denn in diesem Werke zuerst ist die binäre Nomenklatur angewandt worden, nach der jede Pflanze durch einen Gattungs- und Artnamen bezeichnet wird, denen der Name des Autors der Pflanze folgt, z. B. Viola odorata L. Im einzelnen zeigen die zahlreichen Regeln und Kommentare des Kongreßberichtes, wie viele zum Teil recht spitzfindige Fragen erledigt werden mußten. Auch die strenge Befolgung des historischen Prinzips bringt allerlei Unzuträglichkeiten mit sich, die im Interesse der einheitlichen Namengebung in Kauf genommen werden müssen; so muß z. B. der bekannte Name der afrikanischen Wüstenpflanze Welwitschia mirabilis durch den vorher publizierten Tumboa Bainesii ersetzt werden. Als ein anderes Beispiel erwähne ich die Gattung Gynerium, bei dem zugleich die Verschiedenartigkeit der Namengebung ersehen werden kann; das „Pampasgras" der Gärtner mit seinen wundervollen Rispen ist unter dem Namen Gynerium argenteum, den ihm Nees 1829 gab, allbekannt. Nun hatte Nees nicht die Gattung auf die genannte Art begründet, sondern Gynerium war 1809 von Humboldt und Bonpland auf Gynerium saccharoides, das Pfeilgras der süd-

amerikanischen Indianer aufgestellt worden. Der englische Botaniker Stapf zeigte (1897), daß man beide Arten wegen der Verschiedenheit ihrer Blüten nicht in dieselbe Gattung bringen kann; der Name Gynerium blieb also für die ältere Art Gynerium saccharoides, während der so bekannte Name Gynerium argenteum in einer neuen Gattung durch Cortaderia argentea ersetzt wurde. Nun stellte sich heraus, daß für die Pflanze schon ein älterer Name existierte, als Gynerium argenteum, nämlich Arundo Selloana Schult. (1827, nach dem Sammler Sello); die Art wurde daher von Ascherson und Gräbner (1900) Cortaderia Selloana (Schult.) Asch. Gräbn. genannt. Aber auch der Name Gynerium saccharoides (1809) kann nicht bestehen bleiben, da vor Humboldt und Bonpland schon Aublet die Pflanze als Saccharum sagittatum (1775) beschrieben hatte (Arundo sagittata Pers. 1805); von Palisot de Beauvais (1812) wurde der Artname auf Gynerium übertragen, so daß die Pflanze nunmehr Gynerium sagittatum (Aubl.) Pal. Beauv. heißt.

Die natürliche Pflanzenfamilie. Wie schon erwähnt, ist Linné der Begründer der binären Nomenklatur; unter Art und Gattung faßte er wohlbegründete systematische Einheiten zusammen. Dagegen waren die höheren Kategorien in seinem Sexualsystem durchaus unnatürlich; sie vereinigten ganz heterogene Gruppen und trennten nahe verwandte, d. h. in vielen Merkmalen übereinstimmende Gruppen. Das geschah, weil in seinem System ein Merkmal, die Zahl der Staubblätter in erster Linie maßgebend war; aber dieses Merkmal wechselt in engen Verwandtschaftskreisen, wie bei den Gräsern, wo drei oder sechs Staubblätter vorkommen; danach finden sich die Gräser bei Linné in verschiedenen Klassen, weit durch andere Gruppen getrennt. Die klare Erkenntnis dieses Mißstandes findet sich schon in dem in seinen Prinzipien von echtem wissenschaftlichen Geist getragenen Werke von A. L. de Jussieu Genera Plantarum Paris 1789. Dort heißt es in der Einleitung auf S. 33: Inde primarias ex staminum numero et proportione notas minus stabiles deducens, discordes in iisdem sectionibus congerit plantas . . . (wofür Beispiele gegeben werden) . . . Affines aliunde secernit didynamas a tetrandris, Chloram a Gentiana . . . Gramineas triandras ab hexandris etc. Das Rückgrat des Systems bildet nunmehr die natürliche Pflanzenfamilie (von Jussieu als Ordo bezeichnet). Den Unterschied in der Methode charakterisiert Eichler kurz folgendermaßen: „Die Anordnung der Gattungen kann nach vorgefaßten (apriorischen) Einteilungsprinzipien erfolgen, oder wiederum nach ihrer größeren oder geringeren Aehnlichkeit. Ersteres Verfahren wird als künstliche, letzteres als natürliche Methode bezeichnet.“

Der scharf geprägte Charakter und der enge phylogenetische Zusammenhang ist bei einer Anzahl von Familien, wie Gräsern, Palmen, Kompositen usw. unverkennbar; andere Familien, deren Formenkreise auseinander streben und in die nur schwer der Gedanke einer phylogenetischen Einheit hineingetragen werden kann, sind öfters kaum in zureichender Weise kurz zu charakterisieren; in der Beschreibung ihrer Merkmale kehren dann immer die leidigen Ausdrücke „meist“, „gewöhnlich“ wieder, die überall auf die Ausnahmen hindeuten. Solche Familien, die man wohl aus praktischen Gründen bestehen läßt, sind die Loganiaceen oder etwa die Flacourtiaceen. Andererseits wird öfters die Charakteristik einer sonst gut geschlossenen Familie durch das Hereinziehen einer abweichenden Gattung gestört, die eben nur zur betreffenden Familie gestellt wurde, weil sie schließlich dort noch besser als irgend wo anders hinpaßt. Da wird es sich empfehlen auf solche Monotypen oder kleine Gruppen besondere Familien zu bilden, wenn auch praktisch in der Vermehrung der Zahl bei der wichtigsten systematischen Kategorie sicher ein Nachteil liegt. Solche Familien sind die Hoplestigmataceae, die Garryaceae (von den Cornaceen abgetrennt), oder die Phrymaceae, die schon seit längerer Zeit von den Verbenaceen entfernt worden sind. Eine Anzahl der kleinen Familien ist, soweit sie nicht ein besonderes Interesse haben, in der folgenden Aufzählung weggelassen worden.

Die Grundlagen des natürlichen Systems. Das System, in dem Gattungen und Familien angeordnet werden, soll praktisch sein, also z. B. ein leichtes Auffinden unbekannter Formen ermöglichen. Diese Bedingung kann auch ein künstliches System erfüllen. Vom natürlichen System verlangt aber unsere deszendenztheoretische Grundanschauung, daß es phylogenetisch ist, daß es eine bestimmte Stufenfolge von primitiveren zu höheren Typen zum Ausdruck bringt gemäß der wahrscheinlichen zeitlichen Stufenfolge ihrer Entwickelung. Die Gruppen, die das System am engsten vereinigt, sollen die größte Aehnlichkeit besitzen, in den meisten Merkmalen übereinstimmen. Wir sahen, daß darin besonders das System Linnés fehlte. Diese Aehnlichkeit oder Uebereinstimmung ist für uns nach der Deszendenztheorie nicht rein äußerlich, wie sie es wäre, wenn die Arten konstant wären, sondern sie ist der Ausdruck realer Verwandtschaft, einer engen phyletischen Zusammengehörigkeit. „Die Abstufungen dieser Verwandtschaft zu ermitteln, ist Aufgabe der Systematik, und insofern ein System die-

selben darzustellen erstrebt, hat es Anspruch ein natürliches genannt zu werden" (Eichler). Die völlige Erfüllung dieses Verlangens nach einem natürlichen System erscheint illusorisch, da nicht nur eine aufsteigende Stufenleiter vorhanden ist, sondern die Reihen vielfach nebeneinander stehen, von unbekannten ausgestorbenen Vorfahren stammend; was heute höhere Organisation zeigt, braucht sich nicht von heutigen primitiveren Typen herzuleiten. Reihen, die wahrscheinlich eine phylogenetische Einheit darstellen, können in ihren Anfangsgliedern tiefer stehen als die Endglieder vorhergehender Reihen. Ebenso werden öfters in Familien oder Reihen Gruppen vereinigt, die dieselbe Organisationshöhe erreicht haben und nur deswegen in vielen Merkmalen übereinstimmen, übrigens aber einen verschiedenen Ursprung haben und nur durch Konvergenz sich nähern. Manchen Forschern erscheint daher das Ziel der Systematik eng gesteckt; so sagt Graf zu Solms-Laubach (Cruciferenstudien. In Bot. Zeit. 61 (1903)): „Deswegen glaube ich, wird sich eine nüchterne, den Regionen der Phantasie entrückte Systematik für alle Zeiten bescheiden müssen, die Gattungs- und Familienbegrenzung und deren Nomenklatur im wesentlichen nach praktischen Bedürfnissen zu gestalten. Ein phylogenetisches System, wie manch einer es mit jugendlicher Zuversicht von der Zukunft erhofft, wird stets ein pium desiderium bleiben." Mag dieser Pessimismus sich in Zukunft als zu Recht bestehend erweisen; jedenfalls wird immerhin die Systematik, wenn sie eine Wissenschaft bleiben will, nie den Versuch unterlassen können, sich dem idealen Ziele des phylogenetischen Systems anzunähern. „Die für die Praxis aufgestellten Systeme sind nur sehr unvollkommene Näherungsversuche; dasjenige wird das beste sein, welches den jeweiligen Kenntnissen von der Verwandtschaft der Pflanzen am meisten Rechnung trägt" (Eichler).

Es fragt sich nun, welche Merkmale dienen als Kriterien eines phylogenetischen Fortschrittes, welche Merkmale besonders charakterisieren die Organisationshöhe, die eine bestimmte Gruppe erreicht hat?

Der stufenweise Fortschritt ist bei den Kryptogamen leichter erkennbar als bei den Phanerogamen, bei ihnen sind die Linien der Entwicklung im großen genommen deutlicher. Auch die Deszendenz der Gymnospermen, ihr Zusammenhang mit lebenden und ausgestorbenen Gruppen hochstehender Kryptogamen liegt klar zutage. Die beiden Hauptabteilungen des Pflanzenreiches, die Kryptogamen und Phanerogamen sind nicht, wie man früher annahm, durch eine tiefe Kluft geschieden. Vielmehr haben die Untersuchungen über die Fortpflanzung der höheren Kryptogamen und der Gymnospermen gezeigt, daß allerhand Uebergänge vorhanden sind, die die scharfe Unterscheidung verwischen; dazu kommt, daß aus der Kohleperiode Fossilien bekannt geworden sind, die geradezu Mitteldinge zwischen samenlosen und samentragenden Pflanzen darstellen.

Dagegen liegt die Entstehung der Angiospermen im Dunkel. Die Paläontologie könnte hier eine Hilfe sein, wenn uns Uebergangstypen oder primitive Formen fossil aufbewahrt wären. Die Merkmale dieser Formen müßten dann auch die ursprünglicheren sein und Formen, die sie noch heute besitzen, müßten an den Anfang des Systems gestellt werden. Die Wissenschaft der ausgestorbenen Lebewesen läßt uns im Stiche, denn auch der Versuch, der neuerdings unternommen wurde, die Angiospermenblüte von fossilen Benettitaceenblüten abzuleiten, kann nicht überzeugend wirken. Die Bäume ,deren Reste aus der Kreidezeit erhalten sind, in der zuerst sich Angiospermen in der Erdgeschichte zeigen, gehören sehr verschiedene Gruppen an und zeigen schon hohe Differenzierung. So bleiben wir für das System auf die vergleichende Morphologie der heutigen Formen angewiesen und die Gruppierung wird von der Bewertung der Merkmale abhängen, die die rezenten Gruppen aufweisen, vorzugsweise der Blütenmerkmale, da diese am konstantesten sind.

Die neueren Systeme, wie das, dem wir folgen, halten die Scheidung der Angiospermen in die beiden Abteilungen der Monokotylen und Dikotylen aufrecht, sowie die Gruppierung der letztgenannten in Choripetale und Sympetale. Zweifelhaft erscheint, ob bei den Monokotylen und Dikotylen eine völlige Parallelentwickelung vorliegt, wie es z. B. Engler annimmt, oder ob man sich die Monokotylen von primitiveren Dikotylen (etwa der Ranalesgruppe) abgezweigt denken soll. In diesem Falle werden die Monokotylen an den Schluß des Systems zu stellen sein.

Die Reihen der Sympetalen aufzuteilen und die Familien an einzelne Reihen der Choripetalen anzugliedern, dazu liegt trotz mancher neueren Versuche kein Grund und keine Möglichkeit vor. „Da man...wahrnahm, daß für sehr zahlreiche verwandte Gruppen des Pflanzenreichs die verwachsene Blumenkrone ein Hauptcharakteristikum darstellte, so war man berechtigt, diese Formen als Sympetalen zusammenzufassen. Es ist natürlich möglich, daß zu diesen Sympetalen einzelne Gattungen und Familien (z. B. meiner Ansicht nach die Cucurbitaceae) gestellt wurden, welche besser an anderen Stellen im Pflanzenreich untergebracht würden; aber für weitaus die Mehrzahl

ist die enge Zusammengehörigkeit nach dem Urteil aller Forscher der neueren Zeit nicht zweifelhaft. Und da sich leicht zeigen läßt, daß diese Formen in ihrer überwiegenden Mehrzahl eine Organisationshöhe erreicht haben, welche die der Choripetalen weit überragt, so ist kein Grund dafür vorhanden zu zweifeln, daß die Sympetalie eine Weiterbildung ursprünglich freier Kronblätter darstellt. Daß Sympetalie auch bei manchen Familien der Choripetalen auftreten kann, spricht in keiner Weise gegen diese Ansicht, sondern nach den Resultaten zahlreicher Monographen weit eher dafür" (Gilg in Ber. 3. Zusammenkunft Fr. Ver. Syst. Bot. Pflanzengeogr. (1905) 83).

Der Fortschritt bei der Choripetalengruppe liegt nach dem hier befolgten System besonders in der Blütenhülle. Es wird angenommen, daß es Gruppen mit typisch apetalen, nackten Blüten gibt, mit denen das System einsetzt (Piperaceae). Dann folgen Gruppen mit einfacher Blütenhülle, dann solche mit doppelter Blütenhülle, wobei beide Kreise gleich (homoiochlamydeisch) oder in Kelch und Blumenkrone getrennt (heterochlamydeisch) sein können. Einzelne Gruppen, die in naher Verwandtschaft mit solchen mit vollkommener Blütenhülle stehen, können die Blumenblätter oder überhaupt die Blütenhülle durch Reduktion wieder verloren haben (Apopetalie); hierin liegt natürlich im phylogenetischen Sinne ein Fortschritt; eine solche Familie sind die Euphorbiaceen, die an das Ende der Geranialen gestellt werden.

Daneben kommt für unser System ein anderes Prinzip des Fortschrittes erst in zweiter Linie in Betracht, nämlich der Uebergang von Apokarpie zu Synkarpie, von spiraliger Anordnung zu quirliger, und von unbestimmter Zahl der Blütenteile zu fest fixierter. Es folgen also die Ranales, bei denen besonders Spiralstellung und Apokarpie herrscht erst nach den Fagales und anderen Reihen. Andere Entwickelungsstufen, die Bedeutung für unser System der Choripetalen haben, sind etwa der Uebergang von Hypogynie zu Perigynie und Epigynie, von Zwitterigkeit zu Eingeschlechtlichkeit, wobei rudimentäre männliche oder weibliche Organe verbleiben, die Bildung von Synandrien aus freien Staubblättern usw. Die hierin liegenden Merkmale sind in manchen Gruppen des Pflanzenreiches von hoher Konstanz und damit für das System wesentlich, z. B. ist der Fruchtknoten bei allen höher stehenden Familien der drei Hauptabteilungen konstant unterständig; in anderen Familien wiederum wechselt Epigynie und Hypogynie, wie bei den Saxifragaceen und Ericaceen, und bei den Rosaceen z. B. ist die Form der Blütenachse von erstaunlicher Mannigfaltigkeit. Dasselbe gilt für fast alle Charaktere; was hier wesentlich ist, ist dort von geringer Bedeutung; damit ist das stärkste Hemmnis aller Versuche eines natürlichen Systems gegeben. Für die Bewertung der Merkmale bleibt ein weiter Spielraum offen und eine einheitliche Ansicht über die Gestaltung des Systems wird wohl niemals Platz greifen.

Bei den Dikotylen zeigte sich die Verwachsung der Blütenblätter als ein Merkmal von besonderer systematischer Bedeutung, so daß die Abteilungen der Choripetalen und Sympetalen gebildet werden konnten; bei den Monokotylen hat das gleiche Merkmal keinen systematischen Wert. So ist in der Familie der Liliaceen die Blütenhülle getrenntblättrig oder vereintblättrig, wobei alle sechs Blätter meistens gleich sind; bei den Dikotylen kommt typische Sympetalie erst auf höherer Stufe regelmäßig vor, wenn die Blütenhülle in Kelch und Blumenkrone geschieden ist.

In den Grundlagen kommt dem von uns befolgten System jenes nahe, das R. v. Wettstein in seinem Lehrbuch (vgl. „Literatur") veröffentlichte. Auch in diesem System werden die Hauptabteilungen der Monokotylen und Dikotylen beibehalten und diese in Choripetale und Sympetale geschieden. Wettstein ist der Ansicht, daß die Monokotylen sich von den Polycarpicae (Ranales) ableiten, daß also die Dikotylen primär sind und den Monokotylen im System vorangehen müssen. Bei den erstgenannten muß also die Ableitung der Angiospermen gesucht werden. Als ursprüngliche Charaktere betrachtet der Autor Eingeschlechtlichkeit und unvollkommene Ausbildung der Blütenhülle, die mit Anemophilie (Windbestäubung) verbunden ist. Demgemäß beginnt das System mit monochlamydeischen Choripetalen (Fagales, Juglandales usw.); dann folgen die mit vollkommener Blütenhülle versehenen Dialypetalen, mit den Polycarpicae einsetzend und schließlich die Sympetalen, mit vollkommener Blütenhülle und Insektenbestäubung. Zwischen Sympetalen und einzelnen Reihen der Choripetalen nimmt Wettstein vielfache Beziehungen an. Wie vorsichtig der bekannte Deszendenztheoretiker den Grad der Wahrscheinlichkeit angenommener phylogenetischer Zusammenhänge taxiert, geht aus folgenden Sätzen der Anmerkung zur schematischen Darstellung des Zusammenhanges der Angiospermenreihen hervor: „Jede derartige schematische Darstellung ist mit dem Nachteile verbunden, daß die Uebersichtlichkeit leicht die Vorstellung der Sicherheit der Ergebnisse weckt. Das eine derartige Sicherheit bei Versuchen, die genetischen Beziehungen der Pflanzengruppen zu eruieren, derzeit nicht erreichbar ist, möge daher neuerdings betont werden . . . Zur Ver-

meidung von Mißverständnissen sei auch hier betont, daß bei Konstatierung genetischer Beziehungen nicht an solche Beziehungen zwischen den rezenten Vertretern der Typen zu denken ist."

Diese vorsichtige kritische Zurückhaltung fehlt den Versuchen, die in neuerer Zeit H. Hallier unternahm, ein phylogenetisches System zu schaffen. Sein System der Angiospermen beruht nicht auf organischer Weiterentwickelung des Vorhandenen, sondern stürzt alles von Grund auf um. Neues Leben soll aus den Ruinen erblühen, wie der Autor hofft. Nach den von ihm vertretenen Anschauungen braucht die Windbestäubung kein ursprüngliches Merkmal zu sein, sondern die Tierbestäubung ist bei den Angiospermen primär. Als Merkmale der Blüten von Angiospermen hohen Alters, also als primitive Charaktere gelten hauptsächlich die verlängerte Blütenachse, die spiralige Anordnung der Blütenglieder (im Gegensatz zur quirligen), das Auftreten getrennter (nicht zum Fruchtknoten vereinter) Fruchtblätter (Apokarpie), die Vielzähligkeit der Blütenteile, der Uebergang von Kelch- in Blütenblätter. Eine rezente Familie, die diesen Forderungen ungefähr entspricht, sind die Magnoliaceae. Die Polycarpicae bilden daher den Ausgang des Systems, apetale Formen oder Formen mit unentwickelter Blütenhülle, geringer Zahl der Blütenorgane und Windbestäubung (wie bei den Amentifloren) sind abgeleitet; die Sympetalie ist an verschiedenen Stellen entstanden; daher wird die Gruppe der Sympetalen aufgelöst und ihre Reihen werden an verschiedene Reihen der Choripetalen angegliedert. Man wird die Möglichkeit der Ableitung des Systems auf solcher Grundlage nicht bestreiten können; jedenfalls ist eine zufriedenstellende Durchführung bisher nicht erreicht worden. Im einzelnen ist die Gruppierung der Familien und die Einordnung der Gattungen in den von Hallier zum System veröffentlichten Studien den mannigfachsten Schwankungen unterworfen, da der Autor die Merkmale, auf die hin die Verwandtschaft begründet wird, in willkürlicher und verschiedener Weise benutzt. Die Fäden der verwandtschaftlichen Beziehungen sind bei der außerordentlichen Mannigfaltigkeit, mit der sich die Angiospermentypen, die auf derselben Organisationshöhe stehen, in die Breite verlieren, fast unentwirrbar verknüpft und zu leicht wird vergessen, daß „bei Konstatierung genetischer Beziehungen nicht an solche Beziehungen zwischen den rezenten Vertretern der Typen zu denken ist." Das Halliersche System findet sich niedergelegt z. B. in The New Phytologist IV. Nr. 7 (1905) 151—162, wo auch die umfangreiche ältere Literatur angegeben ist (zur Kritik vgl. W. Wangerin, Die Wertigkeit der Merkmale im Hallierschen System. In Ber. 6. Zusammenkunft Fr. Ver. Syst. Bot. und Pflanzengeogr. 1908 (1909) 120—141).

II. Die Blüten der Angiospermen. Sie sind zwitterig (hermaphrodit) oder eingeschlechtlich (diklin), dabei einhäusig oder zweihäusig (monöcisch oder diöcisch). Sie sind selten nackt, nur von Staubblättern und Fruchtblättern gebildet, meist haben sie eine Blütenhülle (Perianth). Die Blätter dieser Hülle stehen seltener spiralig an der Achse, meist sind sie in Kreisen, quirlig, angeordnet und zwar sind 1 bis 2 Kreise vorhanden. Die beiden Kreise können sich als Kelch und Blumenkrone deutlich unterscheiden oder gleich oder fast gleich ausgebildet sein. In diesem Falle wird die Blütenhülle ebenso wie bei dem Vorhandensein nur eines Kreises als Perigon bezeichnet.

Die Samenanlagen, die an den Fruchtblättern (Carpellen) entstehen, sind in den von diesen gebildeten Fruchtknoten eingeschlossen. Entweder entsteht durch Vereinigung mehrerer Fruchtblätter ein gefächerter oder ungefächerter Fruchtknoten, oder die einzelnen Fruchtblätter der Blüte bilden getrennte Fruchtknoten aus; selten ist die Zahl der Carpelle auf eines reduziert. Die Staubblätter haben Antheren mit meist 2 Theken mit je 2 Pollensäcken (Mikrosporangien). Aus einer Zelle des Nucellus in der Samenanlage entwickelt sich der Embryosack (Makrospore); in diesem finden sich vor der Befruchtung nur wenige durch freie Zellbildung entstandene Zellen, unter ihnen nach der Spitze zu die Eizelle; außerdem liegen in der Mitte des Embryosackes zwei Zellkerne, die sich späterhin miteinander vereinigen. Die Pollenkörner (Mikrosporen) werden durch den Wind oder durch Insekten auf die Narbe des Fruchtknotens übertragen und treiben dort zu Pollenschläuchen aus, von denen je einer die Befruchtung je einer Samenanlage vermittelt. Er wächst im Gewebe des Fruchtknotens bis zur Samenanlage fort und dringt meist in die Mikropyle, selten in die Chalaza an der Basis ein (Chalazogamie); der Pollenschlauch enthält zwei männliche, generative Kerne, von denen der eine sich mit dem Eikern vereint. Der andere Kern vereinigt sich mit dem Kern in der Mitte des Embryosackes, der dann durch fortgesetzte Teilung das Nährgewebe (Endosperm) liefert. So entsteht der Same, der von der Samenschale (Testa), den umgebildeten Hüllen (Integumenten) der Samenanlage umschlossen ist.

III. Die Familien der Angiospermen.

1. Klasse Monocotyledoneae.

Der Embryo hat nur ein Keimblatt; der Stamm ist von geschlossenen Gefäßbündeln

durchzogen, daher Fehlen eines typischen Dickenwachstums; die Blüten sind vorwiegend dreigliederig (in der typischen Ausbildung mit fünf Quirlen von drei Blättern). Der Habitus der Monocotyledoneae ist meist recht charakteristisch, die hervorstechenden Vegetationsformen sind die der Palmen, der Bromeliaceen, der Musaceen, der Gräser, der Liliaceen und der Orchideen; für das Gesamtbild von Formationen sind sie in den Tropen bedeutungsvoller als in den gemäßigten Klimaten.

Wir beginnen die Klasse mit Formenreihen, bei denen eine unbestimmte Zahl von Geschlechtsblättern und ursprünglich nackte oder mit unvollkommener Hülle versehene Blüten vorherrschen.

1. Reihe Pandanales. Die eingeschlechtlichen Blüten sind nackt oder haben eine hochblattartige Hülle; Staubblätter und Carpelle kommen in wechselnder Zahl vor; die Blütenstände sind kugelig oder kolbenförmig. Rein tropisch ist die artenreiche Familie der

Pandanaceae, deren Vertreter auf die alte Welt beschränkt sind. Die Blütenstände der Pandanaceae sind kopfförmig oder ährenförmig, in den Achseln von scheidenartigen Hochblättern stehend, die bei Freycinetia zusammengedrängt sind, so daß die Einzelinfloreszenzen gebüschelt sind, während sie bei Pandanus, wo die Scheiden entfernt stehen, traubig angeordnet sind; die ♂ Blüten bestehen aus zahlreichen Staubblättern, die ♀ Blüten aus 1 bis vielen (und dann verwachsenen) Carpellen mit je einer Samenanlage; die Frucht ist eine Drupa oder eine Beere.

Die Gattung Pandanus ist mit mehr als 150 Arten über die Tropen der alten Welt verbreitet und besonders in Papuasien entwickelt; die strauchigen oder baumförmigen Arten sind durch die bogig aus dem Stamm hervorbrechenden Stützwurzeln ausgezeichnet, die rings den Stamm im Boden befestigen; bei den kletternden Freycinetia-Arten dienen die dünneren Luftwurzeln zum Anhaften.

Mit den Pandanaceae sind zwei Familien vorzugsweise der kälteren Klimate im Blütenbau nahe verwandt, deren Vertreter krautige Gewächse sind. Bei den

Typhaceae sind die Blüten nackt, sie stehen in Kolben, die unten ♀, oben ♂ Blüten tragen und von Hochblättern unterbrochen sind; Pflanzen mit kriechenden Rhizomen, Typha. Bei den

Sparganiaceae haben die Blüten eine unscheinbare, aus kleinen Blättchen gebildete Hülle; sie stehen in kugeligen männlichen oder weiblichen Köpfchen. Sparganium, besonders in Mooren und stehenden Gewässern der nördlichen Hemisphäre.

2. Reihe Helobiae. Die Reihe umfaßt eine größere Anzahl Familien von Wasser- und Sumpfgewächsen, deren Blütenentwicklung auf recht verschiedener Höhe steht; die Blütenhülle fehlt ganz oder ist bis zum heterochlamydeischen Typus entwickelt, auch Epigynie kommt vor; die Fruchtblätter sind in wechselnder Zahl vorhanden, frei oder zu einem Fruchtknoten verwachsen; das Nährgewebe ist meist unentwickelt.

Potamogetonaceae. Die eingeschlechtlichen oder zweigeschlechtlichen Blüten sind nackt; sie stehen einzeln oder in ährenförmigen Blütenständen; bei Potamogeton sind blütenblattähnliche Anhängsel der Staubblätter entwickelt. Die Potamogetonaceae sind Bewohner des süßen oder salzigen Wassers auf der ganzen Erde, mit kriechenden Grundachsen, in mannigfacher Weise an das Wasserleben angepaßt.

Bei Potamogeton sind die Blüten zwitterig, die Aehren sind über die Oberfläche emporgehoben und die Bestäubung findet meist durch den Wind statt; bei Zostera marina, dem Seegras, das ganz untergetaucht lebt und bei dem die Aehren zur Blütezeit in die Scheide des obersten Laubblattes eingeschlossen sind, findet die Bestäubung durch den fadenförmigen Pollen unter Wasser statt.

Najadaceae. Die Blüten sind eingeschlechtlich, mit unscheinbaren geschlossenen Hüllen, bei den ♂ Blüten zwei, bei den ♀ eine; die ♂ Blüte mit einer endständigen Anthere, die ♀ Blüte mit einer Samenanlage.

Die Najadaceae leben untergetaucht im süßen Wasser auf der ganzen Erde; es sind einjährige Kräuter; Najas.

Juncaginaceae. Die Blüten sind meist zweigeschlechtlich, mit doppelter, unscheinbarer Hülle; Carpelle in zwei Kreisen, häufig mehr oder weniger steril, frei oder verwachsen. Bei Triglochin enthält jedes Carpell eine Samenanlage; einjährig oder perennierend.

Alismataceae. Die Familie steht zu der Juncaginaceae in Beziehung, ist aber im Blütenbau weiter fortgeschritten; die Blüten sind strahlig und lassen einen dreiblätterigen Kelch und eine dreiblätterige Blumenkrone unterscheiden; Staubblätter sechs oder mehr, Carpelle sechs oder mehr, meist mit einer Samenanlage; schizogene Milchsaftgänge in den Geweben. Die Alismataceae sind Sumpf- oder Wassergewächse der Tropen und der gemäßigten Zonen.

Alisma, mit 6 Staubblättern und kreisförmig angeordneten Carpellen, Sagittaria mit gewölbtem Blütenboden und kopfig angeordneten Carpellen.

Butomaceae. Die Blüten sind ebenso wie bei den Alismataceae strahlig und heterochlamydeisch mit 9 bis vielen Staubblättern und 6 bis vielen Carpellen; bemerkenswert ist die Plazentation, indem die Carpelle die zahlreichen Samenanlagen auf der ganzen inneren Fläche tragen.

Die Familie umfaßt 4 Gattungen mit je einer Art; Butomus umbellatus im gemäßigten Europa und Asien, Sumpfstaude, Hydrocleis, schwimmend, im tropischen Amerika.

Hydrocharitaceae. Die Hydrocharitaceae stellen den fortgeschrittensten Typus in der Reihe dar; die Blüten sind meist eingeschlechtlich, heterochlamydeisch, strahlig,

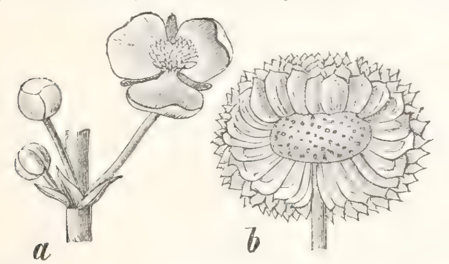


Fig. 1. Sagittaria sagittifolia. a Blüte. b Frucht nach Entfernung eines Teiles der Carpelle.

dreigliederig, die Staubblätter stehen in 1 bis 5 Kreisen; der Fruchtknoten ist unterständig und trägt wandständige Plazenten mit zahlreichen Samenanlagen. Die Hydrocharitaceae sind schwimmende oder untergetaucht lebende, krautartige Gewächse des süßen und salzigen Wassers, deren häufig schön gefärbte Blüten meist über die Oberfläche treten.

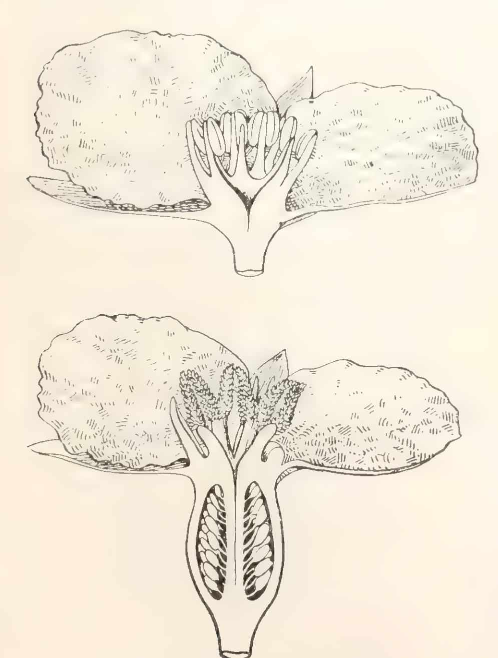


Fig. 2. Hydrocharis morsus ranae. Männliche und weibliche Blüte. Nach Baillon.

Stratiotes, Hydrocharis; Elodea canadensis, Wasserpest, aus Nordamerika in Europa eingeschleppt; Vallisneria spiralis, besonders im Mittelmeergebiet; die ♂ Blüten lösen sich los und steigen an die Oberfläche des Wassers, wo die Bestäubung der an langen Stielen sitzenden ♀ Blüten stattfindet, die darauf durch spiralige Einrollung des Stieles wieder unter Wasser gezogen werden.

3. Reihe Triuridales. Diese Reihe umfaßt nur die kleine, höchst interessante Familie der

Triuridaceae, deren Arten kleine, saprophytische farblose Gewächse der Tropen sind. Die Blütenhülle besteht aus drei bis

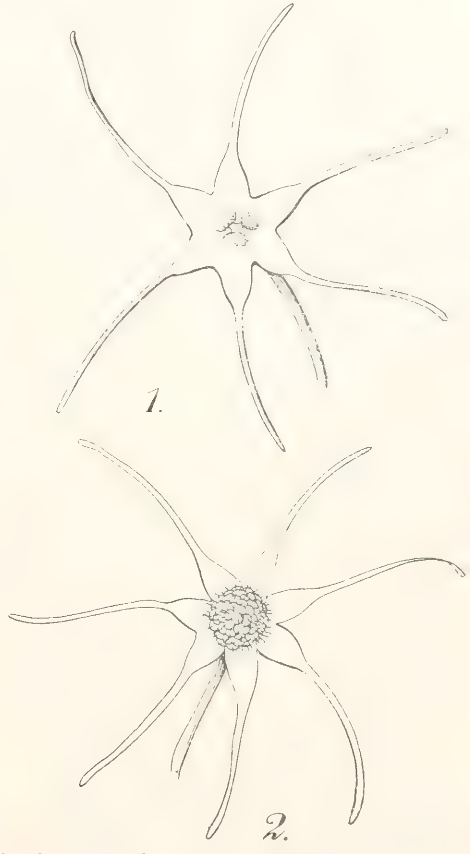


Fig. 3. Triuris lutea. 1. Männliche Blüte. 2. Weibliche Blüte.

mehreren, blumenblattartigen, klappigen Blättern; in den ♂ Blüten stehen mehrere Staubblätter an der scheibenförmigen oder kegelförmigen Blütenachse; in den weiblichen Blüten sind zahlreiche Carpelle mit einer Samenanlage auf der breiten Blütenachse befestigt.

Die Stellung der Triuridaceae ist unsicher, am ehesten stehen sie wohl Familien der Helobiae-Reihe nahe. Triuris in Brasilien, Sciaphila im tropischen Amerika und Asien.

4. Reihe Glumiflorae. Die Reihe umfaßt nur die beiden Familien der Grami-

neae und Cyperaceae. Die Blüten sind nackt oder haben nur eine rudimentäre oder selten eine ausgebildete einfache Blütenhülle; der Fruchtknoten ist stets oberständig und enthält nur eine Samenanlage. In der Familie der

Gramineae hat die Blüte mit ihren Hüllen, den Spelzen, eine sehr verschiedene morphologische Deutung erfahren; wir halten folgende für berechtigt: der rispige oder ährenartige Blütenstand ist aus Partialblütenständen, den Aehrchen (spiculae) zusammengesetzt, die ein- bis mehrblütig sind; die Achse des Aehrchens trägt zunächst zwei (selten drei oder mehr) leere Hochblätter (Hüllspelzen g), dann folgen ein bis mehrere Hochblätter, die in ihren Achseln einen kurzen Sproß erzeugen (Deckspelzen p_1); dieser Sproß trägt ein adossiertes Vor-

Fig. 4. Schema des Grasährchens. g Hüllspelzen, p_1 Deckspelze, p_2 Vorspelze, e Lodiculae B Blüte.

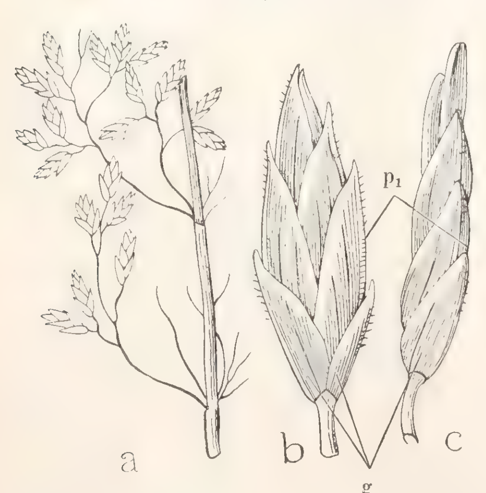


Fig. 5. Poa pratensis. a Teil der Rispe, b, Aehrchen, mehrblütig, Hüllspelzen g und Deckspelzen p_1 sichtbar. Nach Jessen.

blatt (Vorspelze p_2) und eine Blüte, deren Hülle auf zwei (seltener drei) Schüppchen (Lodiculae e) reduziert ist, durch deren Anschwellen zur Blütezeit das Aehrchen geöffnet wird, so daß Staubblätter und Griffel heraustreten.

Die Gräser sind typische Windblütler mit leichtbeweglichen Antheren und federigen oder lang papillösen Narben. Andererseits sind die beiden Lodiculae auch als ein gespaltenes Vorblatt gedeutet werden, das der Vorspelze gegenüber steht (Hackel); hiergegen spricht neben anderen auch das häufige Vorkommen von drei Schüppchen. Staubblätter meist

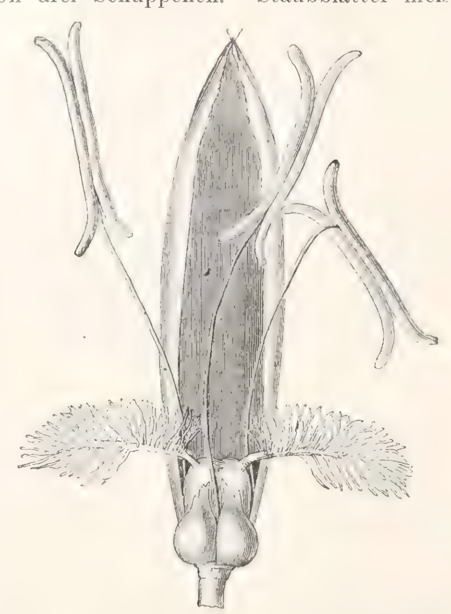


Fig. 6. Festuca elatior. Vorn die beiden Lodiculae, hinten die Vorspelze (palea superior), Fruchtknoten mit federartigen Narben.

drei, selten weniger oder 6 bis 8; Fruchtblatt 1 mit einer Samenanlage; in der Frucht, deren Wandung mit der Samenwandung verwachsen ist (Caryopse) liegt der Embryo

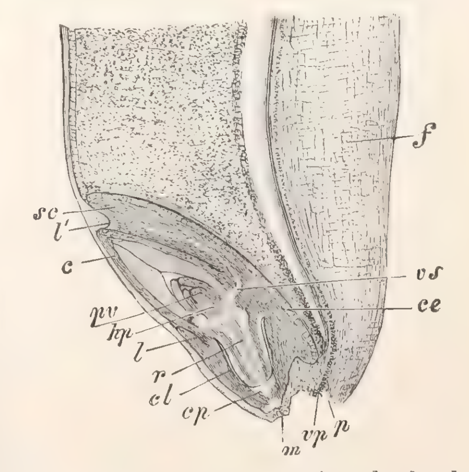


Fig. 7. Medianer Längsschnitt durch den unteren Teil eines Weizenkorns. Links unten der Keim mit dem Scutellum sc, l' Ligula, vs Gefäßbündel des Scutellums, ce sein Zylinderepithel, c Scheidenteil des Kotyledons, pv Stammvegetationskegel, hp Hypokotyl, l Epiblast, r Radicula, cl Wurzelscheide, m Austrittsstelle der Radicula, p Fruchtstiel, vp sein Gefäßbündel, f Seitenwandung der Furche. Vergrößerung 14.

am Grunde nur vom Perikarp bedeckt; die eine Seite läßt schon äußerlich den punkt- oder strichförmigen Nabel (Hilum), die andere Seite das große rundliche Scutellum erkennen, das schildförmig ausgebildete Keimblatt, das dem Embryo die Nahrung aus dem stärkereichen Endosperm vermittelt.

Die Blüten sind meist zweigeschlechtlich, doch kommt auch Polygamie (Andropogon z. B. mit ♂ und ☿ Blüten), Monöcie und Diöcie vor; in den eingeschlechtlichen Blüten finden sich häufig Rudimente des anderen Geschlechtes.

Die Gräser sind einjährig oder perennieren mittels der verkürzten unteren Internodien der Halme und ihrer Verzweigungen; die oberirdischen Halme dauern nur bei den öfters zu gigantischen Formen entwickelten Bambuseen aus; sie sind knotig gegliedert und tragen die Blätter in zwei Zeilen; diese bestehen aus der meist linealischen Spreite, der häutigen oder aus Haaren zusammengesetzten Ligula und der den Halm umfassenden offenen Scheide; die an den Knoten entstehenden Seitensprosse entwickeln sich zunächst innerhalb der Scheide (intravaginale Innovation) oder durchbrechen die Scheide sofort am Grunde (extravaginale Innovation); im letzteren Falle entstehen häufig lange ausläuferartige Sprosse (Dünengräser), im ersteren Falle dichte und kompakte Büschel oder Horste.

Die Gramineen sind mit einem großen Reichtum von Arten und Gattungen über die ganze Erde verbreitet und herrschen besonders auf offenen Formationen, in gemäßigten Klimaten in den Wiesen, in warmen Ländern in Steppen und Savannen. Die holzigen Bambuseen bilden oft ausgedehnte eigene Formationen. Die Verbreitung der Samen erfolgt durch den Wind oder durch Tiere (Cenchrus, Stipa); die Verbreitungsmittel werden von den Spelzen geliefert, die die Früchte dauernd umgeben; nur bei den Kulturformen fallen die Früchte aus den Spelzen heraus.

Das System der Gräser, das nach älteren Vorbildern besonders von Bentham in den Genera Plantarum ausgearbeitet wurde, wurde von neueren Autoren, wie Hackel und Stapf in manchen Zügen verbessert. So gut geschlossen und so sicher begrenzt die Familie nach außen hin ist, so schwierig ist ihre Einteilung und die Begrenzung der einzelnen Triben, die immer, wie auch die Gattungen, durch Uebergänge verbunden sind. Eine Hauptgruppe stellen die Andropogoneae und einige kleinere verwandte Triben dar. Bei ihnen stehen die einblütigen (oder eine ♂ und ☿ Blüte enthaltenden) Aehrchen (Fig. 8) zu zweit, das eine meist sitzend, das andere gestielt; die erste Hüllspelze ist die härteste, härter als die Deckspelze; häufig bildet sie auch mit Gliedern der Spindel ein festes Gehäuse zum Schutz der Frucht; die zartere Deckspelze ist meist begrannt. Die Andropogoneae sind meist tropisch, vorzüglich Steppengräser. Bei den primitiveren Gattungen, wie Saccharum (Saccharum officinarum, Zuckerrohr) sind beide Aehrchen das Paares gleich gebaut, bei Andropogon und Verwandten ist dagegen das gestielte Aehrchen ♂, das sitzende ☿, eventuell

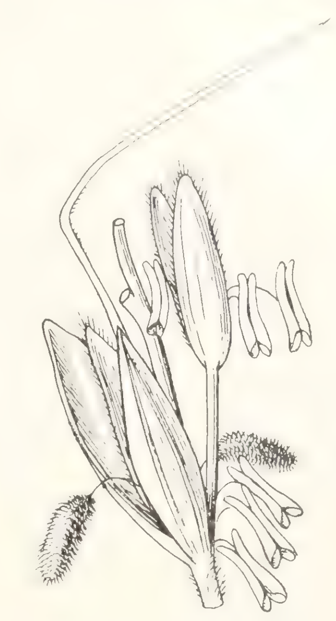


Fig. 8. Andropogon ischaemum. Aehrenpaar, das sitzende Aehrchen zwitterig, begrannt, das gestielte männlich, unbegrannt. Nach Reichenbach.

noch mit einer unteren ♂ Blüte; Andropogon sorghum, Durrha, eines der wichtigsten Getreide warmer Länder. Bei den verwandten Maydeae sind die Aehrchen eingeschlechtlich, bei Zea Mays sind eine endständige ♂ Rispe und seitlich ♀ Kolben vorhanden; der ♀ Kolben des Mais ist

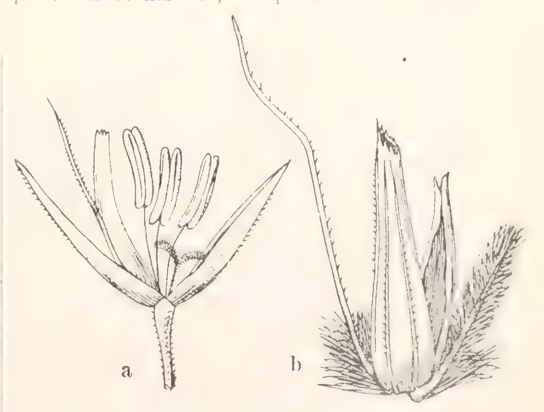


Fig. 9a. Agrostis canina. Aehrchen mit 2 Hüllspelzen und begrannter Deckspelze; die Vorspelze reduziert.

Fig. 9b. Calamagrostis arundinacea. Aehrchen nach Entfernung der Hüllspelzen, an der Basis stark behaart; die Deckspelze mit tief inserierter Granne; steriler bärtiger Achsenfortsatz. Beide nach Reichenbach.

wahrscheinlich eine durch Kultur entstandene erbliche Mißbildung aus einer Rispe. In der Gruppe der **Paniceae** sind drei Hüllspelzen am Aehrchen vorhanden oder die dritte erzeugt eine Deckspelze und eine männliche Blüte; hier sind Deckspelze und Vorspelze der ☿ Blüte besonders verhärtet und umgeben dicht die Frucht; das Aehrchen fällt mit allen Spelzen ab; **Panicum**, eine der artenreichsten Gramineengattungen der wärmeren Länder. Ebenso sind bei den **Oryzeae** Deckspelze und Vorspelze verhärtet, bei den echten Vertretern dieser Gruppe sind die Hüllspelzen klein oder fehlen ganz; **Oryza sativa**, Reis, in den Tropen der alten Welt heimisch. Im Gegensatz zu den bisher genannten Gruppen gliedern sich bei den **Agrostideae** die einblütigen Aehrchen zwischen Hüllspelzen und Deckspelze, so daß erstere stehen bleiben; bei **Aristida** und **Stipa**, vorzüglichen Steppengräsern der wärmeren Länder, umhüllt die langbegrannte Deckspelze dicht die Frucht; die Grannen sind stark hygroskopisch; **Agrostis** mit kurzbegrannten Aehrchen, Wiesengräser. Bei den **Aveneae** sind die Aehrchen zwei-vielblütig, die Deckspelzen tragen meist kräftige rückenständige ge-

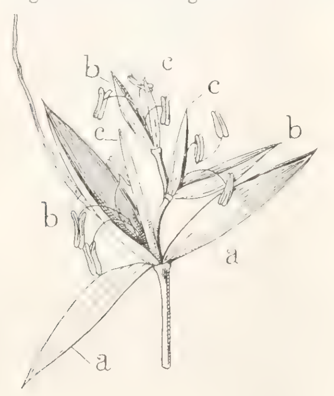


Fig. 10. **Avena sativa**. Mehrblütiges Aehrchen; a Hüllspelzen, b Deckspelzen, die unterste begrannt, c Vorspelzen. Nach **Jessen**.

kniete Grannen; **Avena sativa**, Hafer, aus dem Mittelmeergebiet stammend. Auch bei den **Festuceae** sind die Aehrchen zwei-vielblütig, die Deckspelzen sind meist länger als die Hüllspelzen, unbegrannt oder mehr oder weniger aus der Spitze begrannt; zur gattungsreichen Gruppe rechnen in wärmeren Klimaten besonders **Eragrostis**, in gemäßigten **Poa** (vgl. Fig. 4), **Festuca** und **Bromus**. Verwandt ist die Gruppe der **Chlorideae**, bei denen die Aehrchen sich an der Außenseite der Aehren- oder Traubenspindel zusammenneigen; **Eleusine coracana**, Korakan, in den Tropen der alten Welt kultiviert. Bei den **Hordeeae** bilden die Aehrchen an der Spindel sitzend eine Aehre; hierher gehören die wichtigsten Getreidegräser besonders gemäßigter Klimate; Aehrchen einzeln (**Secale cereale**, Roggen, von **Secale montanum** aus dem Mittelmeergebiet stammend, und **Triticum sativum**, Weizen, dessen Stammpflanze erst neuerdings in Palästina entdeckt wurde) oder zu drei an den Ausschnitten der Spindel (**Hordeum vulgare**, Gerste).

Im Bau der Aehrchen stehen den **Festuceae** nahe die **Bambuseae**, die meist mit starken holzigen Halmen perennieren; Lodiculae meist 3, Staubblätter 3, 6 oder viele; die **Bambuseae** sind über die Tropenzone verbreitet und sind von mannigfachem Nutzen; **Chusquea** in Amerika, **Bambusa**, **Schizostachyum** in der alten Welt.

Fig. 11. A Grundriß der Blüte von **Scirpus silvaticus**. B von **Eriophorum**. Nach **Eichler**.

In der Familie der **Cyperaceae** wird der einfächerige Fruchtknoten von drei Carpellen gebildet; der Embryo ist rings von Nährgewebe umgeben. Die Blüten sind ein- oder zweigeschlechtlich. In der Regel sind 3 Staubfäden vorhanden. Die Blütenhülle besteht selten (Fig. 11) aus sechs einfachen Blättchen, häufig treten (Fig. 11) an ihre Stelle zahlreiche Borsten (Wollgräser) vielfach ist sie auch vollkommen reduziert. Die Riedgräser haben zum Unterschied von den echten Gräsern meist einen dreikantigen Stengel und geschlossene Blattscheiden. Sie sind vorzugsweise Sumpfbewohner. Arten der Gattung Carex sind Hauptbestandteile der Wiesenmoore (saure Gräser).

In dem Tribus der **Scirpoideae** sind die Blüten zweigeschlechtlich, sie stehen in mehr oder minder großen Aehrchen beisammen durch meist braune Spelzen gedeckt. **Cyperus**

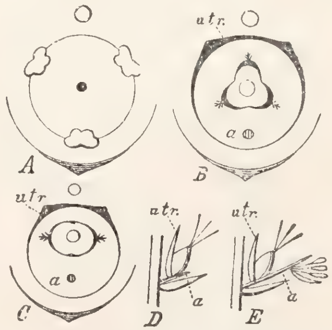


Fig. 12. A Diagramm einer ♂ Carexblüte, B einer dreinarbigen, C einer zweinarbigen ♀ Carexblüte. D Aufriß einer ♀ Carexblüte, E des zwittrigen Aehrchens von Elyna. a Sekundanspoß, utr Utriculus oder Vorblatt des Sekundansprosses. Nach **Eichler**.

mit mehreren hundert Arten in den wärmeren Ländern, **Cyperus papyrus** Papyrusstaude.

Im Tribus der **Caricoideae** sind die Blüten eingeschlechtlich, meist monocöisch, aber ebenfalls in Aehrchen angeordnet. In der Gattung **Carex** (etwa 800 Arten; besonders in gemäßigten oder kalten Klimaten)

sind die Aehrchen bis auf eine Blüte reduziert und in Aehrchen angeordnet. Die männlichen Aehren tragen in der Achsel jeder Spelze 1 Aehrchen mit nur einer dreizähligen männlichen Blüte. Die weiblichen Aehren tragen in der Achsel der Spelzen ein ganz kurzes Sprößchen (das Aehrchen, Fig. 12) und dieses trägt in der Achsel des

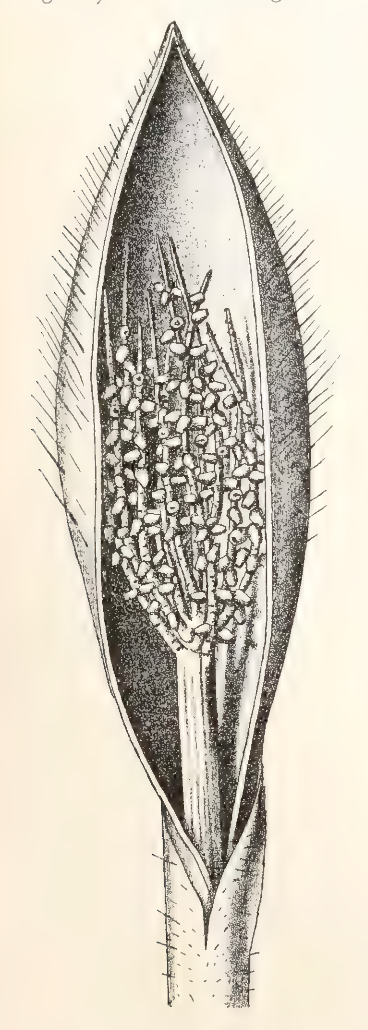


Fig. 13. Infloresecenz von Bactris setosa, nach dem Abfallen der ♂ Blüten, mit der großen Spatha. Verkleinert. Nach Wettstein.

adossierten Vorblattes (utr.) den Fruchtknoten mit 2 bis 3 Narben. Das Vorblatt ist vergrößert und umhüllt schlauchähnlich den Fruchtknoten, und späterhin auch die Frucht. Es wird als Utriculus bezeichnet.

5. Reihe Principes (Palmae). Die Blüten sind meist homoiochlamydeisch, dreigliederig, aktinomorph, mit oberständigem Fruchtknoten aus drei Carpellen mit je einer Samenanlage. Nur die Familie der

Palmae. Die Blüten stehen in einfachen oder zusammengesetzten Aehren oder stärker verästelten Rispen, deren Aeste häufig stark verdickt und fleischig sind (Blütenkolben, Spadices); die Blütenstände, die axillär sind oder selten (Corypha) die Stammspitze abschließen, werden in der Jugend von großen Scheiden (Spathae) umhüllt und später am Grunde oder auch höher hinauf umgeben; die Blüten sind zweigeschlechtlich, monöcisch oder diöcisch, mit unscheinbarer Hülle; Staubblätter meist sechs; die Carpelle sind frei oder verwachsen, die einzige Samenanlage steht der Mittellinie des Carpells gegenüber; die Frucht ist beeren- oder steinfruchtartig, der Same enthält reichliches Nährgewebe, das aus harten und dickwandigen Zellen besteht. Die junge Palme bleibt stammlos, bis die Hauptachse und die grundständige Blattrosette die normale Ausbildung erreicht hat; dann erhebt sich der säulenförmige Stamm; seltener ist der Stamm dünn und rohrartig, sehr zäh, am ausgeprägtesten bei den kletternden Calamus; die Blätter, meist von mächtiger Größe, bilden eine endständige Krone am Stamm; sie sind entweder fächerförmig, verschiedenartig eingeschnitten (Fächerpalme) oder gefiedert (Fiederpalme). Die Palmen sind eine der charakteristischesten Familien der warmen Länder; sie gehen nur mit wenigen Formen in subtropische Gebiete über.

In der Unterfamilie der Coryphoideae sind die drei Carpelle frei oder nur schwach vereint und können sich jedes zu einer Beerenfrucht entwickeln; hierher die diöcische Gattung Phoenix mit Fiederblättern; von den drei Carpellen reift nur eines zur einsamigen Beerenfrucht; Phoenix dactylifera, Dattelpalme, in Nordafrika und Westasien; die übrigen Gattungen haben Fächerblätter; Chamaerops humilis, Zwergpalme im westlichen Mediterrangebiet; Corypha in Indien und Malesien mit mächtiger endständiger Inflorescenz, nach deren Blüte der Baum abstirbt; Copernicia cerifera, Carnauba-Palme in Brasilien, liefert vegetabilisches Wachs. Zur Unterfamilie der Borassoideae gehören Fächerpalmen mit diöcischen Blütenständen; die drei Carpelle sind fest verwachsen und entwickeln sich zu einer ein- bis dreisamigen großen Steinfrucht; Hyphaene thebaica, Doumpalme Aegyptens, Borassus flabelliformis, Palmyrapalme; Lodoicea Sechellarum, auf den Seychelleninseln heimisch; die riesigen Früchte (Seychellennüsse) werden durch Meeresströmungen bis an die Indischen Küsten geführt. In der Unterfamilie der Lepidocaryoideae sind die Blüten eingeschlechtlich oder zweigeschlechtlich; die drei Carpelle sind verwachsen, mit Schüppchen bedeckt; sie bilden gemeinsam eine einsamige, von einem Schuppenpanzer bedeckte Frucht aus; Mauritia, Fächerpalmen des tropischen Amerika; Raphia, Fiederpalmen Afrikas, liefern Raphiabast und Raphia-Piassave; Metroxylon Rumphii, Sagopalme, auf den Sundainseln heimisch, liefert aus dem Stamminnern Sagomehl. Calamus, zahlreiche Arten in den Tropen der alten Welt bis Ostaustralien, kletternd, mit schwachen

Stämmen; die Blätter enden häufig in lange Geisseln und Widerhaken, die die Pflanze befestigen; Calamus rotang (spanisches Rohr). In der Unterfamilie der Ceroxyloideae sind die Carpelle verwachsen und bilden einen ein bis dreifächerigen Fruchtknoten, der zu einer ungepanzerten Frucht auswächst; Blüten monöcisch oder diöcisch; Fiederpalmen; Oreodoxa regia, Königspalme der Antillen; Areca catechu, Betelnußpalme, malesisch, der Fruchtknoten ist einfächerig, mit zwei Samenanlagen, die Frucht ist eine Beere mit reichlicher Faserschicht, die Samen bilden den Handelsartikel; Elaeis guineensis in Westafrika, Oelpalme, mit einsamiger Steinfrucht, deren Mesocarp Palmöl liefert; Cocos nucifera,

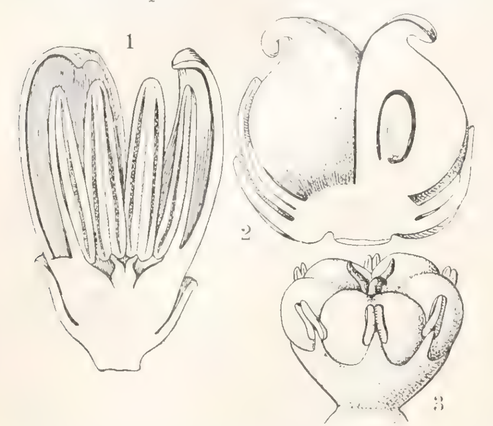


Fig. 14. 1. männliche, 2. weibliche Blüte von Phoenix dactylifera, die männliche mit Fruchtknotenrudiment, 3. Blüte von Chamaerops humilis nach Entfernung der Blütenhülle, 6 Staubblätter, nach unten zu verwachsen, 3 dickfleischige Carpelle. Nach Baillon.

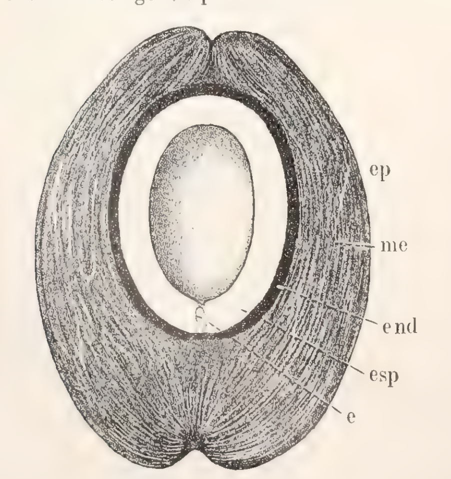


Fig. 14a. Längsschnitt durch eine Kokosnuß. ep Epi-, me Meso-, end Endocarp, esp Endosperm, e Embryo.

Kokospalme, an allen tropischen Küsten verbreitet, besonders aber in Ostasien und Polynesien, wo sie auf den Koralleninseln die herrschende Vegetationsform darstellt; die Kokosnuß ist eine Steinfrucht mit starker Faserhülle; der mit drei Keimlöchern versehene Steinkern ist von drei Carpellen gebildet; er ist durch Abort von zwei Samenanlagen einsamig; die Faserhülle der Frucht liefert Kokosfasern, das getrocknete Nährgewebe Copra; die durch die Faserschicht geschützte Frucht ist schwimmfähig und wird durch Meeresströmungen verbreitet (neuerdings wird die lange Schwimmfähigkeit und die Keimfähigkeit der Samen nach dem Transport von mehreren Autoren angezweifelt); Attalea (tropisches Amerika) liefert Piassavefasern. Ziemlich stark vom gewöhnlichen Palmentypus abweichend ist die Unterfamilie der Phytelephantoideae; ihre Vertreter sind stammlose oder niederstämmige Palmen, deren Blüten in Kolben stehen und nur eine rudimentäre Hülle besitzen; die Früchte stehen kopfig gedrängt und bilden ein Synkarpium; Phytelephas mit zahlreichen Staubblättern in der männlichen Blüte, im tropischen Amerika; die Arten liefern in dem harten Nährgewebe die Samen „vegetabilisches Elfenbein".

6. Reihe Synanthae mit der einzigen Familie der

Cyclanthaceae. Die Blüten sind eingeschlechtlich und bedecken in regelmäßiger Verteilung die Achse eines fleischigen Kolbens, in dem meist die ♂ in Gruppen zu 4 zwischen den ♀ stehen oder (Cyclanthus) die ♂ und ♀ Blüten abwechselnde Ringe oder Spiralen bilden; die ♂ Blüten sind nackt oder mit kurzem Perigon versehen, mit sechs bis vielen Staubblättern; die ♀ Blüte hat gewöhnlich eine Hülle von vier Schuppen, vor denen lange Staminodien stehen; Samenanlagen zahlreich an wandständigen Plazenten; nach Abfall der ♂ Blüten bilden die Beerenfrüchte auf der Oberfläche des Kolbens zusammenhängend ein Synkarpium.

Die Cyclanthaceae sind große Kräuter oder haben einen kurzen Stamm mit Blattkrone; die Blätter sind häufig palmenartig, gefaltet, vielnervig; die Gruppe ist auf das tropische Amerika beschränkt; Carludovica palmata im tropisch-andinen Gebiet liefert in den Blättern Fasern für die Panamahüte. Die Cyclanthaceae stehen im vegetativen Teil den Palmen näher, im Blütenbau nähern sie sich mehr den Araceae, da bei den Palmen niemals zahlreiche Samenanlagen an wandständigen Plazenten vorkommen.

7. Reihe Spathiflorae. Die Blüten sind eingeschlechtlich oder zweigeschlechtlich, mit unscheinbarer, einfacher oder doppelter Blütenhülle oder nackt, meist dreigliederig, vielfach stark reduziert, der Blütenstand ist ein einfacher Kolben mit fleischiger Achse, der von einer (häufig gefärbten) Spatha mehr oder weniger eingeschlossen ist.

Araceae. Die Blüten zeigen in den Gruppen der Familie eine starke Variation in allen Teilen und mannigfache Progressionen; die Blütenhülle besteht aus zwei Quirlen oder ist reduziert, schließlich sind die Blüten auch durch Abort nackt; ebenso können die Staubblätter in zwei Kreisen stehen oder bis auf eines reduziert sein; die Frucht ist eine

Beere; die Blüten sind eingeschlechtlich oder zweigeschlechtlich; die Kolben sind häufig mit einem langen verschieden geformten sterilen Anhang versehen. Die Araceae sind meist krautige Gewächse mit großen Blättern, häufig von bedeutender Größe; der Stamm ist meist sympodial aufgebaut. Sie sind eine vorzugsweise tropische Familie; unter ihnen viele Sumpfgewächse, dann auch viele Kletterer und Epiphyten mit Luftwurzeln.

Anthurium, mit zwitterigen Blüten mit Blütenhülle, artenreiche Gattung im tropischen Amerika; Acorus, Blüten zwitterig, dreigliederig, mit doppelter Blütenhülle; Sumpfgewächse mit dichtblütigem Kolben; Monstera, Blüten nackt, dreigliederig; kletternde Sträucher mit häufig durchlöcherter Spreite, im tropischen Amerika; Calla, Kolben mit ausgebreiteter Spatha, Blüten nackt, dreigliedrig, Calla palustris, Sumpfgewächs in Europa; Dracontium, im tropischen Amerika, Knollengewächse, die jährlich nur ein großes Blatt ausbilden; dieses bei Dracontium gigas mit 3 m langem Stiel und gewaltiger Spreite; Amorphophallus mit großer Knolle und großer tütenförmiger Scheide; der Kolben trägt unten nackte ♀, dann nackte ♂ Blüten und endigt in einem großen gefalteten sterilen Anhang;

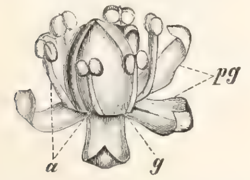


Fig. 15. Blüte von Acorus Calamus. pg Perigon; a Staubblätter; g Fruchtknoten.

Fig. 16. Arum maculatum. Blütenkolben nach Entfernung der Spatha. st. sterile Blüten. ♂ männliche, ♀ weibliche Blüten.

Philodendron, artenreiche Gattung im tropischen Amerika, häufig kletternde Arten, Blüten eingeschlechtlich, nackt; Colocasia, Blüten eingeschlechtlich, Staubblätter zu Synandrien verbunden, krautartig, mit knolligem Grundstock, Colocasia antiquorum, Taro, indisch-malayisch; Arum, Knollengewächse mit pfeilförmigen Blättern, Kolben mit langem, keulenförmigem oder zylindrischem Anhang, in Europa, besonders im Mittelmeergebiet; Pistia stratiotes, eine in den ganzen Tropen verbreitete schwimmende Pflanze mit rundlichen Blättern; ♂ Blüten mit zwei Staubblättern, ♀ ein einfächeriger Fruchtknoten mit vielen Samenanlagen.

Sehr stark reduziert in allen Teilen sind die Lemnaceae. Die Blüten sind eingeschlechtlich, nackt; die ♂ besteht nur aus einem Staubblatt, die ♀ aus einem Carpell mit 1 bis 6 grundständigen Samenanlagen. Die Ausgliederung der Blätter unterbleibt meist an den Sprossen; die Pflanzen sind freischwimmend, klein, die Sprosse mehrerer Generationen hängen meist längere Zeit zusammen.

Lemna, Sprosse mit Wurzeln, Lemna minor, über die ganze Erde verbreitet; Wolffia, Sprosse ohne Wurzeln.

In den folgenden Reihen der Farinosae und Liliiflorae kommt der Typus der Monocotyledonen am reinsten zum Ausdruck, indem bei den vorwiegend strahligen Blüten durchschnittlich fünf dreigliederige Quirle vorhanden sind; die Blüten sind homoiochlamydeisch oder heterochlamydeisch.

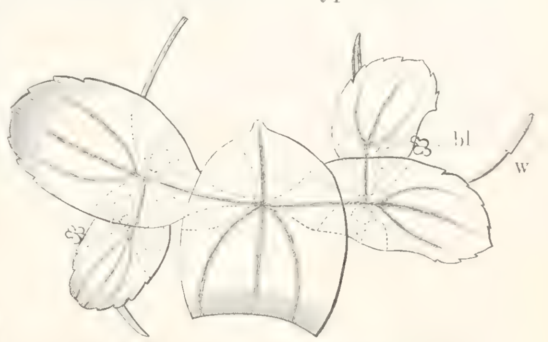


Fig. 17. Lemna trisulca. w Wurzeln. bl Blüte.

8. Reihe Farinosae. Einzelne Quirle der Blüten können Reduktionen erfahren; Samen mit mehligem Nährgewebe; meist krautartige Gewächse.

Restionaceae. Die Restionaceae sind Gewächse von binsenartigem Habitus, von ausgeprägt xerophytischem Bau, nur mit Schuppenblättern versehen, mit den Stengeln assimilierend; die Blüten sind meist diöcisch homoiochlamydeisch, mit unscheinbarer Blütenhülle. Die Familie ist fast ausschließlich in Australien und im Kapgebiet entwickelt.

Mayacaceae. Die Mayacaceen sind kleine Sumpfgewächse mit dichtbeblätterten Stengeln und einzeln stehenden Blüten; die Blüten sind heterochlamydeisch; der Fruchtknoten ist einfächerig, mit wandständigen Placenten. Mehrere Arten in Südamerika, eine in Nordamerika; neuerdings wurde eine Art im südwestlichen Afrika entdeckt.

Xyridaceae. Die Xyridaceen sind rasenbildende krautige Gewächse mit schmalen Blättern; die Blütenschäfte mit endständiger Aehre oder Köpfchen, mit dachziegelig deckenden Hochblättern, die in ihren Achseln je eine heterochlamydeische Blüte

tragen, deren Blütenblätter eine Röhre bilden; Fruchtknoten einfächerig oder unvollkommen dreifächerig. Die Familie ist besonders im tropischen Amerika entwickelt; Xyris.

Eriocaulonaceae. Die Eriocaulonaceen sind krautartige Gewächse mit linealischen Blättern und langen Blütenschäften mit endständigen Köpfchen; die kleinen Blüten sind eingeschlechtlich, regelmäßig oder median zygomorph. Ueber 500 Arten meist der wärmeren Länder, meist sumpfbewohnend.

Eriocaulon (Eriocaulon septangulare im westlichen Nordamerika und in Irland); Paepalanthus.

Bromeliaceae. Die Bromeliaceen sind auf das wärmere Amerika in ihrer Verbreitung beschränkt; es sind meist Xerophyten und Epiphyten; sie bilden gewöhnlich eine Rosette von dicken, fleischigen, häufig dornig gezähnten Blättern aus, der sich die Blütenschäfte erheben; die Blätter tragen schuppenförmige Haare, die befähigt sind, Wasser aufzunehmen, was besonders für die Epiphyten von Wichtigkeit ist. Die Blüten sind heterochlamydeisch, die Petalen häufig verwachsen; der Fruchtknoten ist oberständig bis unterständig, mit vielen Samenanlagen; der Blütenstand ist traubig, rispig oder kopfig, die Hochblätter sind häufig schön gefärbt.

Ananas sativus, in den Tropen überall kultiviert; die „Ananas“ ist ein Fruchtstand mit fleischiger Achse und zahlreichen verwachsenen (sterilen) Früchten, das Synkarpium ist durchwachsen, die Achse bildet oberhalb des Fruchtstandes eine Blattrosette. Von abweichendem Habitus ist Tillandsia usneoides, deren dünne Sprosse von den Bäumen herabhängen (Louisiana-Moos); von Argentinien bis in die südlichen Vereinigten Staaten.

Commelinaceae. Die Commelinaceen sind Kräuter mit knotigem Stengel und scheidigen Blättern; die meist blau gefärbten Blüten stehen in Wickeln; sie sind aktinomorph oder zygomorph, indem häufig die typisch in zwei Kreisen stehenden Staubblätter zum Teil staminodial sind oder ganz fehlen. Die Familie ist in den Tropen und Subtropen verbreitet.

Commelina, mit 3 Staubblättern, über die Tropen verbreitet; Tradescantia, mit 6 Staubblättern, im wärmeren Amerika.

Pontederiaceae. Zu der kleinen Familie der Pontederiaceen gehören Wasser- oder Sumpfpflanzen der wärmeren Länder mit sympodialer Achse und meist ährenförmigem Blütenstand mit ansehnlichen Blüten; die Blüten sind zygomorph, die Petalen sind zu einer Röhre verwachsen.

Eichhornia crassipes; die Art schwimmt meist und hat in den stark angeschwollenen Stielen der breiten Blätter Schwimmorgane; die schön blühende Pflanze (Wasserhyazinthe) ist in Gewässern des tropischen und subtropischen Amerika (besonders Florida) häufig ein lästiges Verkehrshindernis.

9. Reihe Liliiflorae. Der Typus der Blüte ist derselbe wie in der vorigen Reihe; es finden sich Uebergänge von Aktinomorphie zu Zygomorphie und von Oberständigkeit des Fruchtknotens zur Unterständigkeit. Das Nährgewebe ist knorpelig oder fleischig. Häufig sind in der Reihe Zwiebelgewächse, sonst kommt auch sehr verschiedener Habitus vor.

Juncaceae. Die Juncaceen, die in ihrem Habitus mehr an Gräser und Cyperaceen erinnern, stellen in ihrer Blüte einen primitiveren Typus aus der Verwandtschaft der Liliaceen dar; die unscheinbaren, homoiochlamydeischen Blüten sind regelmäßig, mit fünf Quirlen, nur die Staubblätter des inneren Kreises fehlen öfters; der Fruchtknoten ist gefächert oder ungefächert, meist mit vielen Samenanlagen und entwickelt sich zu einer trockenen Kapsel; die Blütenstände sind zusammengesetzt reichblütig, öfters einen Fächer oder eine Sichel bildend.

Fig. 18. Juncus lamprocarpus. a Teil des Blütenstandes, b Blüte, c Gynoeceum. Vergrößert.

Die Juncaceae sind an feuchten Standorten gemäßigter oder kälterer Zonen verbreitet; Juncus, Luzula.

Liliaceae. Die Blüten sind bei den Liliaceen meist regelmäßig und homoiochlamydeisch und korollinisch gefärbt, das Perigon ist frei- oder verwachsenblätterig; der oberständige Fruchtknoten ist drei-

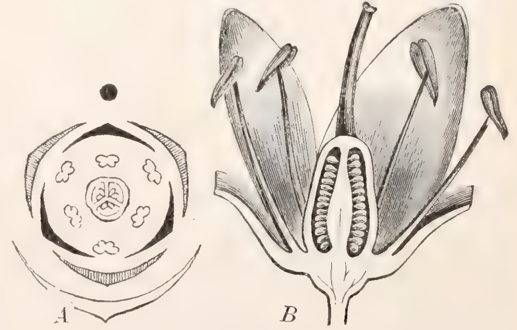


Fig. 19. A Schematisches Diagramm einer Liliaceen-Blüte. B Blüte von Urginea scilla halbiert. Nach Engler-Prantl.

fächerig und entwickelt sich zu einer Beere oder Kapsel. Die Liliaceen sind mit zahlreichen Gattungen und Arten über die Erde verbreitet; meist perennieren sie mit Rhi-

zomen und Zwiebeln, die jährlich blühende Sprosse treiben, selten sind sie strauch- oder baumförmig.

Zur Unterfamilie der Melanthioideae gehören Arten mit Rhizomen oder Zwiebelknolle; die Frucht ist eine fachspaltige oder auch scheidewandspaltige Kapsel; Veratrum album, Nieswurz, mit dickem Rhizom, Europa; Colchicum autumnale, Herbstzeitlose, Europa, mit Zwiebelknolle (knollig verdicktem unterirdischem Stamm, der von Blattscheiden umhüllt ist); die Pflanze blüht im Herbst und treibt im Frühjahr Blätter. Zur Unterfamilie der Asphodeloideae gehören Arten mit Rhizom und grundständigen Blättern oder mit kurzem Stamm; die Frucht ist eine fachspaltige Kapsel; Anthericum, meist in Südafrika, Phormium tenax, Neuseeländischer Flachs; Aloë, mit vielen Arten in trockenen Gebieten Afrikas, mit Rosetten von großen, dornig gezähnten Blättern; mehrere Arten liefern Aloe-Harz. In der Unterfamilie der Allioideae finden sich meist Zwiebelpflanzen; der Blütenstand ist eine dichte Scheindolde mit Hochblättern. Die zahlreichen Arten der Gattung Allium sind besonders im westlichen Mediterrangebiet und in Zentralasien entwickelt, Allium cepa, Zwiebel, Bolle. In der Unterfamilie der Lilioideae finden sich Zwiebelpflanzen mit endständigem Blütenstand; die Frucht ist eine loculicide Kapsel; besonders im Mittelmeergebiet und Westasien. Lilium, Fritillaria, Scilla, Muscari, Hyacinthus. In der Unterfamilie der Dracaenoideae bilden die Arten einen kürzeren oder längeren Stamm aus mit peripherischem Dickenwachstum; Frucht eine Beere oder Kapsel; Yucca, in Zentralamerika, mit großer Rispe, Dracaena in der alten Welt; Dracaena draco, Drachenbaum, hoher reichverzweigter Baum auf den Kanaren. In der Unterfamilie der Asparagoideae perennieren die Arten mit einem unterirdischen, monopodialen oder sympodialen Rhizom; die Frucht ist eine Beere; Asparagus, zahlreiche Arten in trockenen Gebieten der alten Welt, besonders im Kapland, Asparagus officinalis, Spargel, mit kleinen schmalen Kladodien; Polygonatum, Convallaria, Paris in der nördlichen gemäßigten Zone. In der Unterfamilie der Smilacoideae finden sich aufrechte oder meist kletternde strauchige Arten, deren Blüten in Dolden gestellt sind, Smilax, mit vielen Arten in wärmeren Ländern verbreitet (Sarsaparillewurzeln).

Amaryllidaceae. Der Typus der Blüte ist in dieser Familie der gleiche wie bei den Liliaceen; nur ist der Fruchtknoten stets unterständig. Häufig ist außerhalb der Staubblattkreise eine Nebenkrone entwickelt, die ein Anhangsgebilde des Androeceums darstellt; bei Narcissus bildet die Nebenkrone öfters einen großen Becher (Narcissus pseudonarcissus, wo sie wie die Blütenhülle gefärbt ist; bei Narcissus poeticus ist sie kurz, im Gegensatz zur weißen Blütenhülle rötlich). Häufig Zwiebelpflanzen.

In der Unterfamilie der Amaryllidoideae finden sich Zwiebelgewächse mit blattlosem Blütenschaft, der Einzelblüten oder einen doldenartigen Blütenstand trägt; Galanthus, Amaryllis, Narcissus. Besonders ist die Unterfamilie am Kap und im tropischen Afrika entwickelt. Zur Unterfamilie der Agavoideae gehören Arten mit Rhizom oder kurzem Stamm und Rosetten von dicken, fleischigen Blättern; die Blüten stehen in Trauben oder großen Rispen. Die meisten Arten sind amerikanisch; Agave, Agave americana, „die hundertjährige Aloe", in Mexiko heimisch, von langsamer vegetativer Entwickelung, während dann der gewaltige Blütenschaft in kurzer Zeit getrieben wird; Gespinnstpflanze; aus dem nach Entfernung des jungen Blütenschaftes austretenden Saft wird die „Pulque" bereitet.

Velloziaceae. Die Velloziaceae sind strauchige oder baumartige Gewächse mit gedrängten linealischen Blättern und endständigen Einzelblüten; die häufig dichotom geteilten Stengel sind nach unten zu von Blattresten bekleidet; die Blüten haben eine kurze Röhre, sechs Staubblätter und einen unterständigen Fruchtknoten mit vielen Samenanlagen.

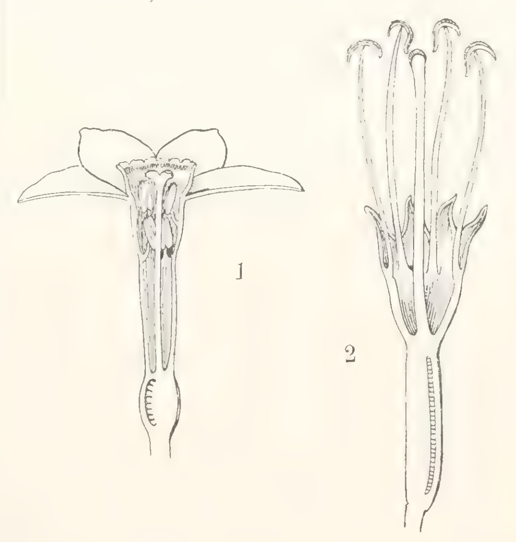


Fig. 20. 1. Blüte von Narcissus poeticus (mit Nebenkrone). 2. Blüte von Agave im Längsschnitt. Nach Baillon.

Vellozia, charakteristisch für die Kampos und Bergländer des zentralen Brasiliens; Barbacenia in Brasilien und Südafrika.

Taccaceae. Eine artenarme Familie eigentümlicher Gewächse von etwas zweifelhafter Verwandtschaft; am ehesten wohl in die Nähe der Amarxllidaceae zu stellen. Das knollige Rhizom entwickelt große, vielfach geteilte Blätter und blattlose Schäfte mit scheindoldigen Blütenständen mit fadenförmigen Hochblättern; die dunkelgefärbte Blütenhülle ist krugförmig oder glockenförmig; Staubblätter sechs; der Fruchtknoten ist unterständig mit wandständigen Plazenten mit zahlreichen Samenanlagen.

Tacca, mit 17 Arten, tropisch, einige Arten liefern in den Knollen eine Sorte Mehl (Arrow-Root).

Dioscoreaceae. Die Dioscoreaceen haben kletternde und schlingende dünne Stengel und stark entwickelte, stärkereiche unterirdische Organe, die verschiedenen morphologischen Wert besitzen, teils als Sproß-, teils als Wurzelorgane gedeutet werden können; die Blüten stehen einzeln oder in kurzen Wickeln, sie sind meist eingeschlechtlich, unscheinbar, homoiochlamydeisch; Staubblätter meist sechs; Fruchtknoten dreifächerig oder einfächerig, Carpelle meist mit zwei Samenanlagen.

Dioscorea, zahlreiche Arten der wärmeren Länder, Dioscorea batatas, Yamswurzel, besonders in Ostasien in Kultur; Testudinaria elephantipes, Hottentottenbrot, in Südafrika, mit riesigem knolligem Rhizom; Tamus communis in Mitteleuropa und im Mittelmeergebiet.

Iridaceae. Wie in den vorigen Familien haben die dreigliederigen Blüten einen unterständigen Fruchtknoten; Staubblätter sind stets nur drei vorhanden und zwar diejenigen des äußeren Kreises; ferner ist charakteristisch, daß die Griffel meist nach oben zu geteilt und häufig blattartig erweitert sind. Seltener Zwiebelpflanzen, vorherrschend ist die Ausbildung von Knollen und Rhizomen. Besonders reich ist die Familie am Kap und im tropischen Amerika entwickelt.

Crocus, mit Knollen, die von Blattscheiden umhüllt sind, im Mittelmeergebiet, Crocus sativus, Safran; Iris, Schwertlilie, mit Rhizom, die Narben blumenblattartig, hundert Arten in der nördlichen gemäßigten Zone; Sisyrinchium, in Amerika, Ixia, Gladiolus und andere Gattungen in Südafrika.

Es folgen nun auf die Liliifloren Reihen, bei denen in der Blüte mannigfache Reduktionen auftreten, Zygomorphie herrscht und die Epigynie der Blütenhüllen zur Regel wird.

10. Reihe Scitamineae. Die Reihe umfaßt eine Anzahl tropischer Familien, deren Angehörige, an feuchtwarmes Klima gebunden, meist durch die strotzende Fülle ihres Blattwerkes auffallen; es sind meist krautartige Gewächse mit ansehnlichen, homoiochlamydeischen oder heterochlamydeischen Blüten, in denen besonders das Andröceum starke Reduktionen und Umbildungen erfährt; die Samen haben gewöhnlich einen gefärbten Arillus und ein doppeltes Nährgewebe (Endosperm + Perisperm).

Musaceae. In der Familie der Musaceen ist Zygomorphie und Reduktion der Blütenteile noch am schwächsten; es sind nur fünf Staubblätter entwickelt; die Blütenhülle ist korollinisch, die Blätter frei oder verwachsen; der unterständige Fruchtknoten ist dreifächerig, die Fächer mit 1 bis vielen Samenanlagen.

Musa, Banane, Pisang, im tropischen Amerika heimisch, überall in wärmeren Ländern kultiviert; die Banane hat ein Rhizom und einen mächtigen Scheinstengel, der von den Scheiden der großen Blätter gebildet wird; der Blütenstand geht vom Rhizom aus; er ist ährenartig, in den Achseln der großen Brakteen sitzen eine Anzahl von Blüten; nur der untere Teil des Blütenstandes ist fertil; die kultivierten Bananen (Musa sapientum, Musa paradisiaca) haben in ihren Früchten keinen Samen; Ravenala madagascariensis „Baum der Reisenden", in den Tropen vielfach kultiviert, stammbildend, mit einer Krone mächtiger, fächerförmig gestellter Blätter.

Zingiberaceae. Die Blüten lassen meist Kelch und Blumenkrone unterscheiden; der Kelch ist röhrenförmig, die Corolle nach unten zu röhrig, nach oben zu in Zipfel gespalten; die Blüten sind stark zygomorph, von den Staubblättern des inneren Kreises ist nur eines fertil, dem das aus zwei Staminodien gebildete korollinische Labellum gegenübersteht; manchmal kommen noch zwei Staminodien des äußeren Kreises vor; der

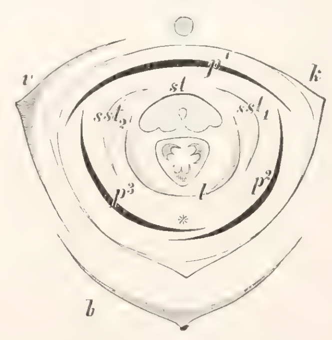


Fig. 21. Diagramm einer Zingiberaceen-Blüte. b Deckblatt, v Vorblatt, k Kelch, p1—3 Petalen, st Staubblatt, sst Seitenstammodeen, l Labellum. Nach Eichler.

Griffel in einer Rinne des fruchtbaren Staubblattes; Fruchtknoten meist dreifächerig. Die artenreiche Familie ist besonders im tropischen Asien zu Hause.

Curcuma longa, Gelbwurzel, Gurgemei, Curcuma zedoaria, Zittwerwurzel; Zingiber officinale, Ingwer, tropisches Asien, Elettaria cardamomum, Malabar-Cardomomen, Vorderindien, Amomum cardamomum, Siam-Cardamomen.

Cannaceae. Die ansehnlichen Blüten sind heterochlamydeisch und zweigeschlechtlich; die Korallenblätter sind am Grunde verwachsen; neben mehreren petaloiden Staminodien ist nur ein Staubblatt fertil und zwar auch nur zur Hälfte, indem die eine Seite der Anthere blattartig ausgebildet ist, daher die Blüte unsymmetrisch; der unterständige Fruchtknoten ist dreifächerig mit vielen Samenanlagen, die Frucht kapselartig.

Canna, im tropischen Amerika heimisch, Canna indica, Blumenrohr; die Anzahl der

Arten der Gattung ist schwer anzugeben, da die Formen als beliebte Kulturpflanzen vielfach gekreuzt sind.

Marantaceae. Die Blüten sind hier gleichfalls unsymmetrisch, indem nur ein Staubblatt zur Hälfte fertil ist; mehrere Staminodien sind petaloid, das eine innere (Kapuzenblatt) ist kappenförmig und umfaßt vor der Anthe e den Griffel; der Fruchtknoten ist dreifächerig mit nur einer Samenanlage in jedem Fach, oder nach Abort von zwei Fächern wird nur eine Samenanlage ausgebildet.

Die Marantaceae, Staudengewächse der Tropen, besonders der Urwälder, sind in der alten und neuen Welt formenreich entwickelt; Phrynium, Calathea, Maranta, Maranta arundinacea (tropisches Amerika) mit stärkemehlreichen Knollen (Arrow-Root).

11. Reihe Microspermae. Die Blüten sind dreigliederig, meist mit bedeutender Reduktion im Andröceum; der Fruchtknoten ist unterständig, dreifächerig oder einfächerig, mit vielen kleinen Samenanlagen an den Plazenten.

Burmanniaceae. Die Blütenhülle ist verwachsenblätterig, die inneren drei Abschnitte sind kleiner als die äußeren oder abortiert; Staubblätter sechs oder drei, meist mit der Röhre vereinigt, häufig mit breitem Konnektiv; die Kapsel enthält viele kleine Samen mit Nährgewebe.

Die Verwandtschaft der Burmanniaceae ist einigermaßen zweifelhaft, sie vermitteln vielleicht den Uebergang von den typischen Monocotylen zu den Orchideen. Sie sind kleine Kräuter mit schmalen Blättern oder Saprophyten mit Schuppenblättern, in den Tropen; Burmannia mit dreikantiger oder dreiflügeliger Röhre, in der alten und neuen Welt.

Corsiaceae. Die Blüten sind zygomorph, indem ein Abschnitt der Blütenhülle breit entwickelt ist im Gegensatz zu den fünf anderen kleinen; sechs Staubblätter; die wandständigen Plazenten tragen zahlreiche Samenanlagen.

Kleine Saprophyten oder Parasiten: Corsia mit 3 Arten in Neu-Guinea, Arachnites mit 1 Art in Chile.

Apostasiaceae. Die kleine Familie wurde bislang den Orchideen zugerechnet, sie hat entschieden verwandtschaftlichen Anschluß bei den Liliifloren; die Blüte ist fast aktinomorph; die Filamente sind mehr oder weniger mit dem Griffel vereint; ein Staubblatt öfters staminodial; der Fruchtknoten ist dreifächerig mit zentralwinkelständigen Plazenten. Humusbewohner des tropischen östlichen Asien mit kurzem Rhizom.

Orchidaceae. Die häufig großen und schön gefärbten, mannigfaltig gestalteten Blüten der Orchidaceae sind zygomorph und meist heterochlamydeisch, im Typus dreigliederig. Das unpaare Petalum ist meist durch eine besondere Form und Färbung ausgezeichnet und wird Lippe (labellum) genannt. Von Staubblättern sind seltener die beiden paarigen des inneren Kreises entwickelt (Orchidaceae Diandrae), meist ist nur ein Staubblatt des äußeren Kreises vorhanden (Orchidaceae Monandrae), alle anderen abortieren oder sind zu Staminodien reduziert. Die Staubblätter und Narben sind durch eine Verlängerung der Blütenachse (Säule) über die Petalen herausgehoben. Das ganze Gebilde wird als Gynostemium bezeichnet. Oefters (wie bei der Gattung Orchis) ist die Säule kaum angedeutet, der Geschlechtsapparat also fast sitzend. Die

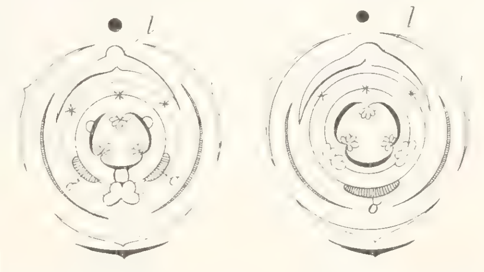


Fig. 22. Links Diagramm von Orchis, rechts von Cypripedium. l Labellum, σ Staminodien. Nach Eichler.

Anthere des einzelnen Staubblattes steht entweder frei und aufrecht an der Spitze der Säule (z. B. Orchis), oder aber sie neigt sich nach der Innenseite der Säule, bis zur hängenden Stellung über; das Filament ist meist dick und kurz; die Anthere ist zwei- bis mehrfächerig; die Pollenkörner sind zu je vier fest verbunden, sie treten zu Pollenmassen (Pollinien) zusammen, die die Antherenfächer ausfüllen und von weicher oder mehr wachsartiger Konsistenz, seltener etwas pulverig sind; häufig sind in den Pollenmassen kleinere Abteilungen (Massulae) zu unterscheiden. Nur zwei von den Narbenlappen sind empfängsnisfähig, der dritte ist meist zu dem sogenannten Rostellum umgebildet, das bei der Bestäubung eine Rolle spielt. Der ganze Blütenbau der Orchidaceae weist auf die ausgeprägteste Anpassung an Insektenbesuch hin; die prächtige Färbung und der Geruch dienen als Anlockungsmittel, die Lippe ist als Landungsstelle der Insekten geeignet. Selbst für den Besuch bestimmter Insekten sind die Blüten in der Weise eingerichtet, daß bei deren Fehlen nur durch künstliche Uebertragung des Pollens eine Befruchtung erzielt werden kann (z. B. bei der Kultur der Vanille). Bei Orchis und verwandten Formen ist die Anthere dem Rostellum mit der Basis angeheftet und zwar durch Vermittelung zweier dünner Fortsätze, indem sich aus erhärtendem Schleim fadenförmige Stränge (Caudiculae) bilden; die Caudiculae haften an einer Klebmasse,

die das Rostellum durch Desorganisation von Gewebe bildet; oben stehen die Caudiculae mit den Pollinien in Verbindung. Ein besuchendes Insekt, das die Klebmasse berührt, zieht nun mit dieser die Caudiculae und die Pollinien aus der reifen Anthere heraus. In anderen Fällen tritt das Rostellum mit der Spitze der Anthere in Kontakt; auch hier können von den Pollinien aus Caudiculae nach dem Rostellum gebildet werden, oder das Rostellum bildet selbst ein besonderes

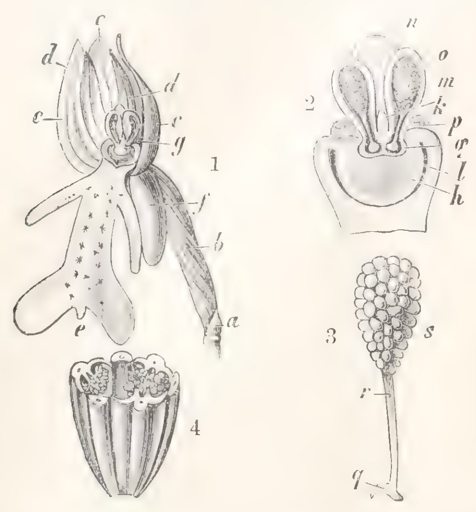


Fig. 23. Orchis militaris. 1 Blüte: a Braktee, b Unterständiger Fruchtknoten, c Kelchblätter, d, e Blütenblätter (e Labellum), f Sporn, g Gynostemium. 2 Androeceum und Gynoeceum: h Narbe, l Rostellum, k Schnäbelchen, Fortsatz des Rostellums, m Antherenfach, n Konnektiv, o Pollinium, q Klebmasse, p Staminodien. 3 Einzelnes Pollinium: r Caudicula, s Pollenmassen, 4 Frucht im Querschnitt. Nach Berg und Schmidt.

klebriges Gewebestück aus, das mit dem Anthereninhalt sich verbindet. Im einzelnen herrscht in diesen Dingen eine außerordentliche Variation.

Die Insektenbestäubung gibt zu Bastardierung leicht Anlaß; die Orchidaceae neigen zu Bastardierung, zahllose Hybriden, sogar auch von Arten verschiedener Gattung sind in der Kultur künstlich hergestellt worden.

Der unterständige Fruchtknoten ist meist einfächerig mit drei gegabelten, wandständigen Plazenten, selten mehr oder weniger gefächert; die Frucht ist eine Kapsel mit sehr zahlreichen winzig kleinen Samen.

Die Orchidaceae sind vorzugsweise in den Tropen mit vielen artenreichen Gattungen entwickelt; in neuerer Zeit ist eine solche Formenfülle zur Kenntnis der Spezialforscher gekommen, daß man wohl die Orchidaceae als die artenreichste Familie der Angiospermen betrachten muß und ihre Zahl mit 15 000 nicht zu hoch einschätzt; allein in Deutsch-Neu-Guinea hat R. Schlechter etwa 1500 Arten beobachtet. In den gemäßigten Zonen ist ihre Bedeutung viel geringer; hier finden sich nur kleinere Formen mit Blüten mäßiger Größe, die blaß gefärbt saprophytisch auf Humus des Waldbodens leben, in dem sie ein korallenartig verzweigtes Rhizom entwickeln, oder erdbewohnende Arten feuchter Standorte mit großen Laubblättern; letztere Arten entwickeln Rhizome oder haben Reservestoffbehälter in den knollig angeschwollenen Wurzeln. Die größte Pracht und Mannigfaltigkeit ihrer Blüten entfalten die Orchidaceae in den epiphytischen, baumbewohnenden Formen der tropischen Wälder. Seltener sind diese Arten monopodial, indem die Hauptachse immer weiter wächst und aus den Achseln der älteren Blätter die Blütenstände hervorkommen, meist ist ihre Achse sympodial aus Stücken verschiedener Jahrestriebe zusammengesetzt. Dabei können die Jahrestriebe von Blütenständen abgeschlossen werden (Orchidaceae Acranthae) oder sie stellen ihr Wachstum allmählich nach Bildung von ein bis mehreren Laubblättern ein, während die Blütenstände axillär sind (Orchidaceae Pleuranthae). Der Stamm der sympodialen Epiphyten zeigt knollenförmige Verdickungen (Pseudobulbi), die als Wasserspeicher dienen; ferner sind sie durch Luftwurzeln ausgezeichnet, die vom Gewebe des „Velamens“ umgeben sind, das befähigt ist Regenwasser aufzunehmen.

Unterfamilie Diandrae: Die beiden paarigen Staubblätter des inneren Kreises sind fruchtbar; alle drei Narbenlappen sind annähernd gleich gestaltet und empfängnisfähig. Cypripedium, besonders in der nördlichen gemäßigten Zone, Cypripedium calceolus, Frauenschuh, in Buchenwäldern, Paphiopedilum, zahlreiche großblütige tropische Arten; beide Gattungen mit schuhförmig ausgebildeter großer Lippe.

Unterfamilie Monandrae: Nur das unpaare Staubblatt des äußeren Kreises fruchtbar; die beiden paarigen Narbenlappen empfängnisfähig, der dritte meist zum Rostellum umgebildet.

A. Monandrae-Basitonae: Die Antherenfächer entwickeln nach der Basis zu Caudiculae, die mit den Klebmassen des Rostellums in Verbindung treten; die Anthere fällt niemals ab. Hierher gehören die in der nördlich gemäßigten Zone verbreitetsten mit Knollen versehenen Gattungen, Orchis, Ophrys, Gymnadenia, Platanthera; in den Tropen artenreich entwickelt ist die Gattung Habenaria.

B. Monandrae-Acrotonae. Die Pollinien haben kein Anhängsel oder entwickeln Caudiculae von der Spitze der Anthere aus. Die Caudiculae sind selbst klebrig und können Insekten anhaften oder sie kommen mit Kleb-

massen des Rostellums in Kontakt. Die Anthere fällt leicht ab.

a) Acranthae. Der Blütenstand ist terminal an den einzelnen Gliedern des Sympodiums. Hierher gehören Saprophyten, wie Corallorrhiza, Neottia (N. nidus avis nach dem Vogelnest ähnlichen Rhizom) und Epipogon, dann Erdorchideen wie Cephalanthera, Listera, Malaxis. Zahlreich sind auch tropische Epiphyten vertreten, von denen viele in Kultur sind, am bekanntesten sind die tropisch amerikanischen Gattungen Epidendrum, Cattleya und Laelia. Hochklimmende Pflanzen mit langen Internodien und dicken Blättern sind die Vanillaarten; Vanilla planifolia, im östlichen Mexiko heimisch, liefert in den Früchten Vanille; die Pflanze wird auch sonst in den Tropen kultiviert.

b) Pleuranthae. Blütenstände seitlich, nicht Sympodialglieder abschließend. Tropische Gattungen. Die kleinere Zahl ist im Aufbau monopodial, wie Vanda und Angraecum (altweltlich), meist ist ein Sympodium ausgebildet. Artenreiche Gattungen, vielfach in Kultur, sind Dendrobium (tropisches Asien), Odontoglossum, Oncidium, Maxillaria (tropisches Amerika).

2. Klasse Dicotyledoneae.

Der Embryo besitzt zwei Keimblätter. Der Stengel ist von offenen Gefäßbündeln durchzogen, die auf dem Querschnitt in einem Kreise angeordnet erscheinen; durch die Tätigkeit des Kambiumringes erfolgt ein unbegrenztes Dickenwachstum. Die vorherrschenden Zahlen der Glieder in den Kreisen der Blüte sind vier und fünf.

a) Unterklasse Archichlamydeae (Choripetalae und Apetalae). Die Blumenblätter sind, wenn überhaupt vorhanden, frei, nicht miteinander verwachsen.

Entweder sind die Blüten nackt (achlamydeisch) oder mit einem einfachen Perigon versehen, das entweder hochblattartig (prophylloid) oder blumenblattartig (petaloid) ist; oder aber die Blütenhülle ist doppelt und dabei beide Kreise gleichartig (homoiochlamydeische Blüten) oder in Kelch und Blumenkrone gesondert (heterochlamydeische Blüten). Ist die innere Blütenhülle abortiert, so sind die Blüten als apopetal zu bezeichnen.

1. Reihe Verticillatae. Die Reihe wird nur von der Familie der Casuarinaceen gebildet, die mit keiner Gruppe der Angiospermen in nähere Beziehungen zu bringen sind und in manchen Zügen sich an die Gymnospermen anschließen (Spaltöffnungen); die Blüten sind chalazogam; im Nucellus werden eine größere Zahl von Embryosäcken angelegt, von denen sich nur einer weiter entwickelt, und eine Eizelle und Synergiden bildet; wie bei den übrigen Angiospermen findet doppelte Befruchtung statt. Blüten eingeschlechtlich, monöcisch, nackt; die männlichen mit einem Staubblatt, die weiblichen mit zwei Carpellen; nur ein Fach des Fruchtknotens ist fertil, mit zwei bis vier gradläufigen Samenanlagen.

Casuarinaceae. Die Casuarinaceae sind Holzgewächse, die meist in Australien heimisch sind, mit rutenförmigen Zweigen mit kleinen Schuppenblättern; die in einzelne Quirle gestellten männlichen Blüten bilden ährenförmige Blütenstände an den Enden von Zweigen, die weiblichen Blüten bilden kopfförmige Infloreszenzen.

Casuarina equisetifolia, an den Küsten der Tropen in der alten Welt verbreitet, liefert Eisenholz.

2. Reihe Piperales. Die Blüten sind nackt oder haben selten eine unscheinbare, gleichartige Blütenhülle; Staubblätter 1 bis 10, Carpelle 1 bis 4; Blüten in Aehren.

Piperaceae. Die nackten eingeschlechtlichen oder zweigeschlechtlichen Blüten stehen in der Achsel von Deckblättern in dichten Aehren; der Fruchtknoten ist einfächerig, mit einer grundständigen, gradläufigen Samenanlage; die Frucht ist eine Beere, der Same enthält Endosperm und Perisperm. Die Piperaceae sind eine rein tropische Familie, Kräuter oder Sträucher, die im Stengel mehrere Kreise von Gefäßbündeln besitzen; außerdem charakteristisch das Vorkommen von Oelzellen.

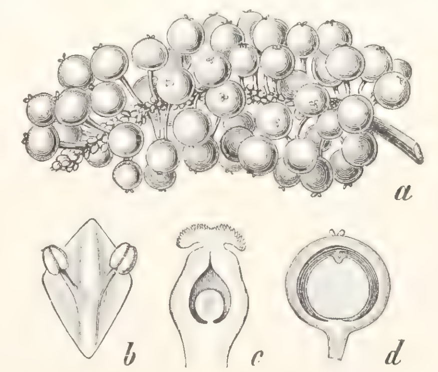


Fig. 24. Piper cubeba. a Fruchtstand; b, c männliche und weibliche Blüte vergrößert; d Frucht. Nach Berg und Schmidt.

Piper, 600 Arten in den Tropen, häufig klimmende Sträucher; Piper nigrum, Pfeffer, in Indomalesien heimisch, liefert in den getrockneten Beerenfrüchten schwarzen Pfeffer, in den vom Perikarp befreiten Früchten weißen Pfeffer, Piper cubeba, indisch-malayisch (Kubeben), Piper betle, Betelpfeffer, die Blätter werden zusammen mit der Nuß der Arekapalme genossen, Piper methysticum, Kavapflanze der Sandwichinseln.

An die Piperaceen werden die kleinen Familien der Chloranthaceae und Lacistemaceae angereiht, ohne daß ihre wirkliche Verwandtschaft sicher wäre; die Blüten sind

nackt oder haben eine hochblattartige Hülle; beide Familien unterscheiden sich von den Piperaceen durch die hängenden Samenanlagen und das einfache Nährgewebe; die Lacistemaceae sind Sträucher oder kleine Bäume im tropischen Amerika, die Chloranthaceae Kräuter oder Holzgewächse in Ostasien, im Gebiet der Pacifischen Inseln und im tropischen Amerika.

3. Reihe Salicales. Die Blüten sind stets nackt und diöcisch, mit einem verschieden gestalteten Diskus versehen; Staubblätter zwei bis viele; die beiden Carpelle der weiblichen Blüten bilden einen einfächerigen Fruchtknoten mit wandständigen Plazenten mit vielen Samenanlagen; die Frucht ist eine Kapsel; die zahlreichen Samen haben am Grunde einen Haarschopf. Einzige Familie:

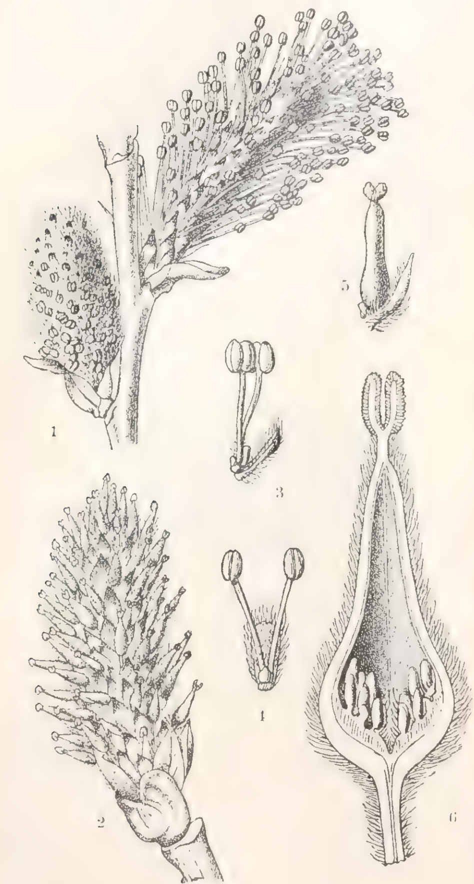


Fig. 25. Salicaceae. 1 Salix repens, ♂ Infloreszenz. 2 Salix retusa, ♀ Infloreszenz. 3 und 4 ♂ Blüte von Salix alba. 5 ♀ Blüte von Salix alba. 6 Längsschnitt durch den Fruchtknoten von Salix Caprea. Nach Wettstein.

Salicaceae. Die Salicaceae sind Holzgewächse, die meist in den nördlich-gemäßigten Gebieten heimisch sind, mit spiraligen Blättern mit Nebenblättern, und kätzchenförmigen männlichen und weiblichen Blütenständen.

Populus, Pappel, mit becher- oder krugförmigem Diskus, Populus alba, Silberpappel, Populus tremula, Zitterpappel; Salix, Weide, der Diskus auf einzelnen Zähne an der Blüte reduziert, artenreiche Gattung, die Arten neigen besonders zur Bastardierung; in den Alpen und in der Arktis sind ganz niedrige, dem Boden angedrückte Arten vorhanden (Gletscherweiden); einige arktisch-alpin.

4. Reihe Myricales. Die Blüten sind nackt, eingeschlechtlich; weibliche Blüten mit zwei Carpellen, der einfächerige Fruchtknoten mit einer grundständigen Samenanlage mit einem Integument; Frucht eine Steinfrucht. Einzige Familie:

Myricaceae. Die Myricaceae sind Halbsträucher oder größere Holzgewächse mit einfachen Blättern; die Blüten stehen in dichten Aehren in den Achseln von Deckblättern.

Gale palustris (Myrica Gale), Heide- und Moorstrauch in Westeuropa, Rußland, Sibirien, Nordamerika, männliche Blüten mit vier Staubblättern, die beiden seitlichen Vorblätter der weiblichen Blüte verwachsen mit der Frucht, so daß diese geflügelt erscheint; Myrica, 50 Arten mit zerstreuter Verbreitung in wärmeren Ländern, Frucht mit wachsausscheidenden Emergenzen, Myrica cerifera in Nordamerika, Myrtelwachs.

5. Reihe Juglandales. Die Blüten sind eingeschlechtlich, monöcisch, nackt oder mit einfacher blattartiger Blütenhülle; männliche Blüten mit 3 bis 40 Staubblättern; weibliche Blüten meist mit Perigon, mit zwei Carpellen; der einfächerige Fruchtknoten mit einer grundständigen Samenanlage; Frucht eine Steinfrucht oder Nuß, Samen ohne Nährgewebe; Chalazogamie. Einzige Familie:

Juglandaceae. Die Juglandaceae sind Bäume mit abwechselnden, gefiederten Blättern, die reich an aromatischen Stoffen sind; die männlichen Blüten stehen in Kätzchen an vorjährigen Zweigen axillär, die weiblichen in endständiger kurzer Aehre an diesjährigen Zweigen; das Deckblatt und die beiden Vorblätter sind dem Fruchtknoten meist angewachsen und bilden ein Involukrum.

Juglans, Walnuß, mit Steinfrucht mit großen, ölreichen, runzeligen Cotyledonen, Juglans regia, im östlichen Mittelmeergebiet und im Himalaya heimisch, Carya, Hickory, in Nordamerika.

Den eben erwähnten Reihen von primitiven Typen werden von Engler (Syllabus 1897 und 1909) einige artenarme oder monotypische Familien von zweifelhafter Verwandtschaft angeschlossen, die je eine eigene Reihe bilden und sehr isoliert dastehen. Wir erwähnen die Julianiaceae (vgl. W. Botting Hemsley, On the Julianiaceae. In Trans. Linn. Soc. 1907, 169 bis 197); es sind Bäume mit gefiederten Blättern,

von denen fünf Arten aus Mexiko und Peru bekannt sind; die männlichen Blüten stehen in großen Rispen und haben eine einfache Blütenhülle, die weiblichen sind nackt und haben einen einfächerigen Fruchtknoten mit einer Samenanlage; sie sind zu 3 bis 4 von einem kelchartigen Involukrum eingeschlossen, aus dem sie zur Fruchtreife frei werden, die Schließfrüchte stehen auf stark verbreitertem Stiel. Hemsley weist der Gruppe ihre Stellung in der Nähe der Cupuliferen an. Ferner die Batidaceae mit der einzigen Art Batis maritima, ein Sträuchlein mit fleischigen Blättern, das an den Küsten des wärmeren Amerika und der Sandwichinseln vorkommt (vgl. Ph. van Tieghem, Sur les Batidaceae. Journ. de Bot. 17 (1903) 363); die Blüten sind diöcisch, nackt; die weiblichen haben einen zweifächerigen Fruchtknoten mit zwei Samenanlagen in den Fächern, die dann noch durch falsche Scheidewände getrennt werden.

6. Reihe Fagales. Die anemophilen Blüten sind seltener nackt, gewöhnlich mit einfacher, unscheinbarer Blütenhülle, und sind meist eingeschlechtlich monöcisch; der Fruchtknoten ist unterständig, Carpelle 2 bis 6 mit je 1 bis 2 Samenanlagen; nur Holzgewächse mit abwechselnden Blättern mit Nebenblättern.

Betulaceae. Die männlichen Blüten sind einzeln oder zu dritt dem Deckblatt aufgewachsen, nackt oder mit einfacher Blütenhülle, mit 2 bis 10 Staubblättern, die Frucht ist eine einsamige Schließfrucht; Same ohne Nährgewebe.

Die männlichen Blüten einzeln auf dem Deckblatt bei Carpinus und Corylus; Carpinus betulus, Hainbuche, Weißbuche, in Mittel- und Südeuropa; weibliche Blüten in Kätzchen; Deckblatt und Vorblätter bilden eine große dreilappige Fruchthülle; Corylus avellana, Haselnuß, Europa, der weibliche Blütenstand ist von der Form einer Laubknospe, mit 4 bis 6 gedrängten Deckblättern, deren jedes zwei Blüten trägt, diese mit zwei langen, karminroten Griffeln, Fruchtknoten mit zwei Samenanlagen, von denen nur eine in der Nuß zur Reife kommt.

Die männlichen Blüten je drei auf dem Deckblatt Figur 22 (in Dichasien, eine Blüte terminal, zwei seitlich); die weiblichen Blüten nackt, ihre Vorblätter dem Deckblatt angewachsen: Betula, Alnus; Betula, Birke, mit reichblütigen männlichen und weiblichen Kätzchen, Betula nana, Zwergbirke, in den Mooren von Nordeuropa und Nordasien; Alnus, Erle, Alnus glutinosa, in Europa und Sibirien, die weiblichen Blütenstände sind kurze aufrechte Zapfen, der Fruchtzapfen mit verholzenden, aus Deckblatt und Vorblättern zusammengesetzten Schuppen.

Fagaceae. Die Blüten sind monöcisch, die männlichen in Kätzchen, mit einfacher Hülle und Staubblättern in gleicher Anzahl oder zahlreicher als die Blätter der Hülle; die weiblichen Blüten und die Früchte sind von einer beschuppten oder bestachelten Wucherung der Achse, dem Fruchtbecher, einzeln oder zu mehreren umgeben; der unterständige Fruchtknoten ist dreifächerig, mit je zwei Samenanlagen in Fach; nur eine

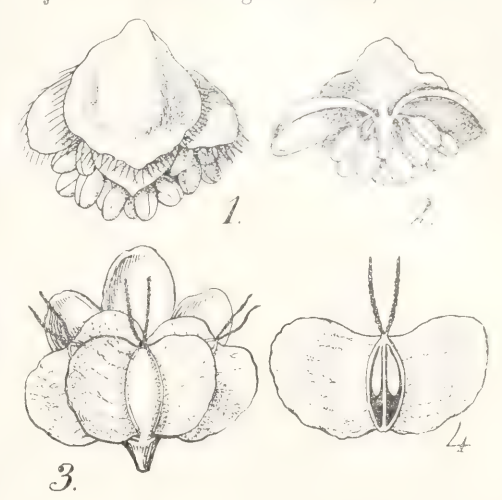


Fig. 26. Betula alba. 1. Männliche Blütengruppe mit Deckblatt und 2 Vorblättern von außen; 2. Dasselbe von unten; 3. Gruppe von 3 geflügelten Früchten; 4. Einzelfrucht. Nach Reichenbach.

Samenanlage wird in der Schließfrucht zum Samen entwickelt. Die Fagaceae sind Holzgewächse mit ungeteilten oder eingeschnittenen Blättern.

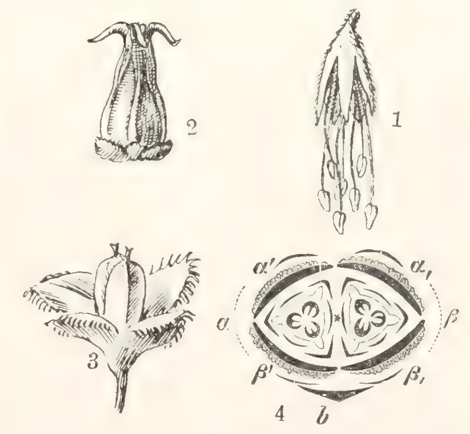


Fig. 27. Fagus silvatica. 1 männliche, 2 weibliche Einzelblüte. 3 Cupula, geöffnet mit 2 Früchten. 4 Diagramm weiblicher Dichasien, b Deckblatt. α, β die Vorblätter der zugehörigen Blütengruppe; α', β' die Vorblätter der (Secundan-)Blüte aus α; $\alpha_{,}, \beta_{,}$ die der Blüte aus β. Nach Eichler.

Fagus silvatica, Rotbuche, im westlichen Europa bis 60°, in Südeuropa auf Gebirgen; die weiblichen Blüten zu zweit im stacheligen, vierteilig aufspringenden Fruchtbecher; die nahe verwandte Gattung Nothofagus mit einer Reihe von Arten im antarktischen Gebiet; Castanea vulgaris, Edelkastanie, Früchte

(Maronen) zu drei im Fruchtbecher, in Mittelmeergebiet und in den Südalpen heimisch; Quercus, Eiche, die männlichen Blüten in lockeren Kätzchen, die weiblichen in armblütigen Aehren, einzeln im Fruchtbecher, der napfförmige, schuppige Fruchtbecher umgibt den unteren Teil der Schließfrucht; 200 Arten in den gemäßigten Gegenden und in den Tropen, besonders in Nord- und Zentralamerika und in Ostasien, Quercus pedunculata, Sommereiche, Quercus sessiliflora, Wintereiche, eine wichtige Nutzpflanze ist Quercus suber, Korkeiche, im westlichen Mittelmeergebiet.

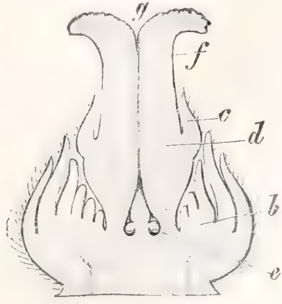


Fig. 28. Quercus pedunculata. Längsschnitt durch den jungen Fruchtknoten. b Becher, e Samenanlagen, d Fruchtknoten, c Perigon, f Griffel, g Narbe. Vergrößert. Nach Berg und Schmidt.

7. Reihe Urticales. Die meist strahligen Blüten sind homoiochlamydeisch, meist zweigliederig, mit den Staubblättern vor den Perigonblättern; der oberständige Fruchtknoten ist einfächerig, mit einer Samenanlage.

Ulmaceae. Die Blüten sind zwitterig oder eingeschlechtlich; die Staubblätter in

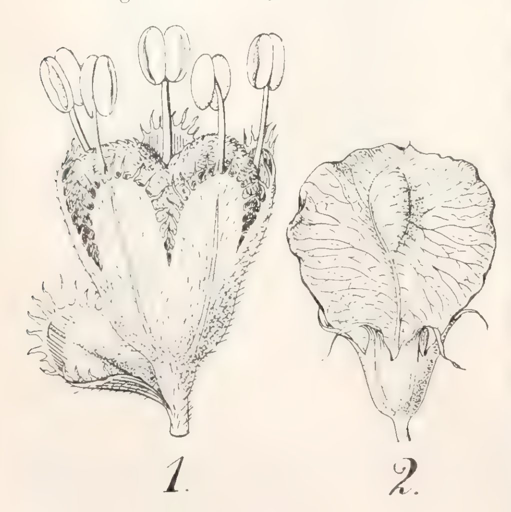


Fig. 29. Ulmus campestris. 1. Blüte, die Staubblätter vor den Perigonzipfeln, im Innern die zweischenkelige große Narbe sichtbar; 2. Flügelfrucht mit Kelch.

den männlichen Blüten meist in gleicher Zahl wie die Perigonblätter; Fruchtknoten mit zwei Narben und mit einer herabhängenden, anatropen oder gekrümmten Samenanlage. Die Ulmaceae sind Holzgewächse mit zweizeiligen Blättern, von tropischer und extratropischer Verbreitung.

Ulmus mit sitzenden Blütenbüscheln, die Frucht eine breit geflügelte Nuß, Ulmus campestris, Rüster; Celtis, die Blüten in Büscheln oder einzeln, Steinfrucht, Celtis australis, Zürgelbaum, im Mittelmeergebiet.

Moraceae. Die Blüten sind stets eingeschlechtlich, mit einfacher Blütenhülle oder selten nackt; Fruchtknoten mit einer herabhängenden, gekrümmten Samenanlage; anatomisch sind die Moraceae durch das Vorkommen von Milchsaft charakterisiert. Die Moraceae sind vorzugsweise in wärmeren Ländern verbreitet, sie sind meist Holzgewächse; die Blüten stehen in Cymen, die häufig köpfchenartig verkürzt sind oder durch Verbreiterung der Achse zu Scheiben oder Bechern werden.

Morus, Maulbeerbaum, die Blütenhüllen der weiblichen Köpfchen werden fleischig, die Früchte bilden zusammen die Maulbeere, Morus nigra mit dunkelroten Früchten, Morus alba mit weißen oder schwarzen Früchten, letztere Art in China heimisch, von Bedeutung als Nahrung für die Seidenraupen; Broussonetia papyrifera, in Japan, liefert Bast zur Papierbereitung; Artocarpus, Brotfruchtbaum, Artocarpus incisa auf den Sundainseln heimisch und Artocarpus integrifolia, in Ostindien heimisch, viel kultiviert, mit großen, kopfförmigen, eßbaren Scheinfrüchten; Castilloa elastica, im tropischen Amerika, liefert Kautschuk, Ficus mit großen intrapetiolaren Nebenblättern, 600 Arten, fast alle tropisch, im Mittelmeergebiet Ficus carica, Feige; die eßbare Feige ist die fleischige becherförmige Achse (Receptaculum) des Fruchtstandes, in der zahlreiche kleine Früchte (Nüßchen, sitzen; es existieren zweierlei Arten von Stöcken, solche, die in ihren Receptacula weibliche Blüten enthalten und solche, die in diesen im oberen Teil männliche, im unteren Teil verkümmerte weibliche Blüten enthalten (Caprificus); in den Fruchtknoten der letzteren (Gallenblüten) legen Gallwespen ihre Eier ab; die ausschlüpfenden Insekten nehmen den Blütenstaub der männlichen Blüten aus dem oberen Teil des Receptaculums mit und können beim Besuch von weiblichen Receptacula die in diesen vorhandenen Blüten bestäuben; bei der tropischen Arten ist die Geschlechtsverteilung mannigfach variiert; es sind teilweise riesige Formen, wie Ficus bengalensis in Indien, dessen herabhängende Luftwurzeln zur Erde ge-

Fig. 30. A weiblicher Blütenstand. B Fruchtstand von Morus alba. Nach Duchartre.

langt Wurzeln treiben, so daß der Baum viele Stämme entwickelt, Ficus elastica, Gummibaum, in Ostindien heimisch, liefert Kautschuk.

Cannabinaceae. Im Blütenbau eng mit den Moraceen verwandt; die Blütenhülle der weiblichen Blüten ist sehr kurz, napfförmig. Der einfächerige Fruchtknoten mit hängender Samenanlage. Die Cannabinaceae sind krautige Gewächse, zum Unterschied von den Moraceen ohne Milchsaft.

Humulus lupulus, Hopfen, windendes Kraut, die weiblichen Blüten in kurzen zapfenförmigen Blütenständen mit dachziegelig deckenden Hochblättern, die lupulinhaltige Drüsen tragen; Cannabis sativa, Hanf, aufrechtes Kraut, wichtige Gespinnstpflanze, liefert das Narkotikum Haschisch im Orient.

Urticaceae. Zum Unterschied von den vorigen Familien enthält der einfächerige Fruchtknoten eine grundständige aufrechte Samenanlage. Die Urticaceae sind meist krautige Gewächse, ohne Milchsaft, häufig mit Brennhaaren.

Urtica, Brennessel; Boehmeria nivea, wichtige Gespinnstpflanze Ostasiens (die Bastfasern der Rinde).

8. Reihe Proteales. Die Büten sind strahlig, mit einfacher Blütenhülle; die Staubblätter vor den Perigonblättern, mit ihnen mehr oder weniger vereint. Nur die Familie

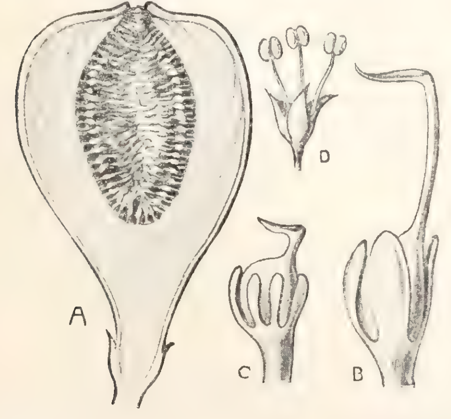


Fig. 31. Ficus carica. A. Längsschnitt durch einen Blütenstand; B. weibliche Blüte; C. Gallenblüte; D. männliche Blüte. B bis D vergrößert.

der Proteaceae. Die Blüten sind vierzählig; die Blütenhülle ist korallinisch, klappig; der Fruchtknoten wird von einem Carpell gebildet und enthält eine bis viele Samenanlagen an der Bauchnaht. Die Proteaceae sind Holzgewächse mit lederartigen Blättern und traubigen Blütenständen, die zum größten Teil in Australien, dann in Südafrika heimisch sind; sie bewohnen trockene Standorte.

Protea, Leucadendron im Kapland, Hakea, Grevillea, Banksia in Australien.

9. Reihe Santalales. Die Blüten sind strahlig, mit einfacher Blütenhülle, die Staubblätter vor den Perigonblättern; Carpelle 2 bis 3 verwachsen; zu jedem Carpell gehört eine vom Scheitel herabhängende Samenanlage; häufig sind Placenta und Samenanlagen nicht deutlich ausgegliedert, die Embryosäcke liegen dann im Gewebe im Inneren des Fruchtknotens.

Loranthaceae. Perigonblätter 4 bis 6, häufig groß und schön gefärbt; die becherförmige Aehre ist mit dem Fruchtknoten verwachsen und bildet nicht selten oberhalb desselben um die Basis der Blütenhülle einen gekerbten Rand (Calyculus); Plazenta und Samenanlagen meist nicht ausgegliedert.

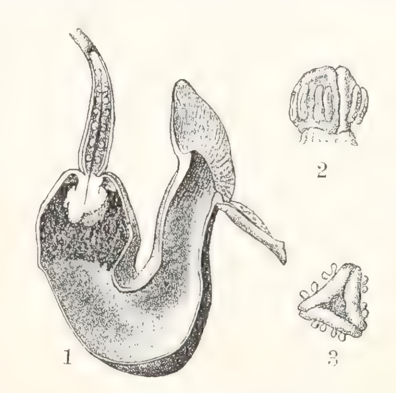


Fig. 32. Aristolochia macrophylla. 1 Blüte durchschnitten; 2 Griffelende mit Staubblättern; 3 Narbe von oben. Etwas vergrößert. Nach Wettstein.

Die Loranthaceae sind holzige, auf Bäumen schmarotzende Halbparasiten mit ausgebildeten Laubblättern.

Viscum, Mistel, die Blütenachse an der Halbfrucht verschleimt und wird klebrig; viele Gattungen und Arten in den Tropen, Loranthus, 300 Arten in den Tropen der alten Welt.

Santalaceae. Blüten meist klein, Perigonblätter 4 bis 5, klappig, meist hochblattartig; die Blütenachse ist becherförmig oder röhrenförmig über dem Fruchtknoten; auf diesem ein Discus; Fruchtknoten einfächerig mit drei von der zentralen Plazenta herabhängenden Samenanlagen; krautige oder holzige Halbparasiten, die auf Wurzeln schmarotzen.

Osyris, mediterran, Santalum album, Sandelbaum, indisch-malayisch, mehrere Arten ferner auf den Sandwichinseln; Thesium, verbreitete Gattung, viele Arten in Südafrika.

An die Santalales wird angeschlossen die tropische Familie der Olacaceae; es sind Holzgewächse mit kleinen Blüten, an denen sich ein kleiner Kelch findet, der aber zur Fruchtzeit meist stark vergrößert wird; der Fruchtknoten ist nur im unteren Teil gefächert, die Samenanlagen hängen einzeln von der freien Plazenta herab;

Schöpfia, Olax, Ximenia. Ferner die Familie der Balanophoraceae, deren verwandtschaftliche Beziehungen schwer festzustellen sind, da sie als Parasiten starke Reduktionen erfahren haben. Die Balanophoraceae sind fleischige, chlorophyllose Wurzelparasiten mit knolligen Rhizomen; die Blüten sind eingeschlechtlich, die weiblichen meist nackt, die Samenanlagen sind (bis auf Cynomorium) integumentlos; die Blüten stehen gewöhnlich in kopfigen oder kolbenförmigen Blütenständen. Cynomorium coccineum, Hundskolben, im Mittelmeergebiet, mit zylindrischem Kolben, Balanophora, indisch-malesisch; Langsdorffia hypogaea, tropisch-amerikanisch.

10. Reihe Aristolochiales. Die Blüten sind meist zygomorph, mit einfacher korollinischer Blütenhülle; der Fruchtknoten ist unterständig, gefächert oder ungefächert.

Aristolochiaceae. Die korollinische Blütenhülle ist meist dreizählig, mit mehr oder weniger langer Röhre; Staubblätter 6 bis 36, frei oder mit der Griffelsäule zu einem Gynostemium vereinigt; der unterständige Fruchtknoten ist gefächert, Frucht eine vielsamige Kapsel.

Bei Asarum ist das Perigon strahlig, dreilappig; perennierende Kräuter in der nördlichen gemäßigten Hemisphäre; bei Aristolochia ist die Blüte zygomorph, häufig groß und schön gefärbt, die Röhre ist um das Gynostemium bauchig erweitert und geht in einen großen, einseitigen Saum aus; meist schlingende Holzpflanzen der wärmeren Länder; aufrecht krautig ist Aristolochia clematitis, Osterluzei, im Mittelmeergebiet und Mitteleuropa.

Rafflesiaceae. Die Rafflesiaceae sind chlorophyllose Wurzelparasiten, deren Vegetationskörper ganz reduziert ist; er bildet thallusähnliche Gewebe, häufig mycelförmige Zellfäden in der Wirtspflanze; nur die Blütensprosse mit wenigen Schuppenblättern brechen hervor; die meist eingeschlechtlichen Blüten stehen an ihnen einzeln oder in Trauben; die Perigonblätter sind frei oder zum Teil vereint; die Staubblätter verwachsen mehr oder weniger zu einer zentralen Columna; der Fruchtknoten ist unterständig einfächerig bis vielfächerig-kammerig, mit parietalen Plazenten mit zahlreichen Samenanlagen.

Rafflesia, Sundainseln, auf Cissus, mit riesigen tellerförmig ausgebreiteten Blüten, diese bei Rafflesia Arnoldi auf Sumatra bis 1 m Durchmesser; Pilostiles, besonders Amerika, aud Aesten von Leguminosen, kleine Parasiten; Cytinus hypocistis, mit traubigem Blütenstand, auf Cistuswurzeln im Mittelmeergebiet.

11. Reihe Polygonales. Die Blüten sind strahlig, homoiochlamydeisch oder heterochlamydeisch; der oberständige Fruchtknoten wird von meist drei Carpellen gebildet; er ist einfächerig und enthält eine grundständige aufrechte Samenanlage. Einzige Familie:

Polygonaceae. Die Polygonaceae haben meist dreigliederige Blüten mit bis 69 Staubblättern; die Frucht ist eine dreikantige einsamige Nuß, der Same enthält mehliges Nährgewebe. Die Arten sind meist krautig mit spiraligen Blättern, die am Grunde eine stengelumfassende Nebenblattscheide (Ochrea) entwickeln, die nach dem Abfallen des Blattes stehen bleibt. Hauptverbreitung in der nördlichen gemäßigten Zone.

Rumex, mit 6 Staubblättern, 100 Arten, Rumex acetosa, Sauerampfer; Rheum, mit 9 Staubblättern und dreiflügeliger Frucht, ausdauernde, oft sehr große krautige Gewächse mit handförmig genervten, mehr oder weniger einge-

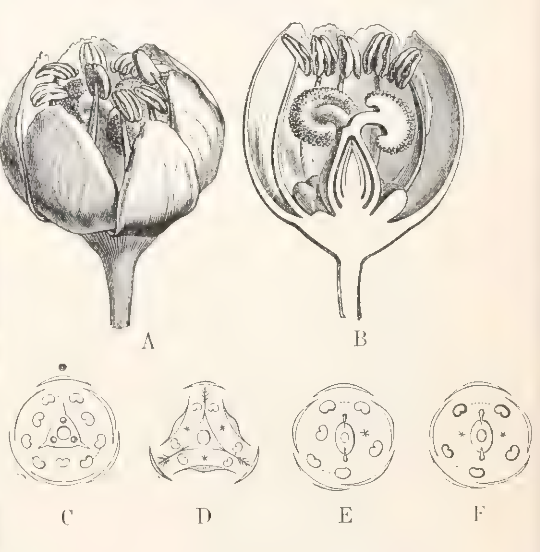


Fig. 33. A Blüte von Rheum ganz; B Dieselbe im Längsschnitt. Nach Luerssen. C Diagramm von Rheum, D von Rumex, E von Polygonum lapathifolium, F von Polygonum amphibium.

schnittenen Blättern und großen Rispen, in Asien, mehrere Arten (Rheum officinale in Tibet und Westchina) liefern Rhabarber; Polygonum, mit 5 bis 8 Staubfäden, Knöterich, mit 150 Arten über die Erde verbreitet; Fagopyrum esculentum, Buchweizen, auf sandigem, armem Boden angebaut; baum- und strauchförmige Arten in den Gattungen Coccoloba und Triplaris im tropischen und subtropischen Amerika, Triplaris-Arten werden von Ameisen bewohnt.

12. Reihe Centrospermae. Die Blüten haben eine einfache oder doppelte Hülle; sie sind meist fünfzählig; der Fruchtknoten ist gewöhnlich oberständig, mit einer bis vielen gekrümmten (kampylotropen) Samenanlagen, Samen mit Perisperm (aus dem Nuzellusgewebe hervorgegangenes Nährgewebe) und einem gekrümmten Embryo. Meist krautige Pflanzen.

Chenopodiaceae. Blüten mit einfacher, gewöhnlich fünfzähliger Hülle; Staubblätter von den Perigonblättern, in der Knospe gekrümmt; Carpelle zwei, selten mehr, sie bilden einen einfächerigen Fruchtknoten mit einer grundständigen Samenanlage. Die Chenopodiaceaeen bewohnen besonders Wüsten und Steppen und zwar bevorzugen sie salzhaltigen Boden; als typische Halophyten sind sie dann auch Meerstrandpflanzen; ferner gehören zu den Chenopodiaceen weitverbreitete Ruderalpflanzen; ihren Standorten entsprechend zeigen sie Anpassungen im inneren Bau, besonders Wassergewebe in den Blättern, ferner finden sich eigentümliche kurzgestielte Blasenhaare, die austrocknend die Blätter mehlig bestäubt erscheinen lassen.

Salicornia herbacea, weitverbreitete halophile Strandpflanze; Chenopodium, Gänsefuß, Atriplex, Melde, verbreitete Ruderalpflanzen; ihre Frucht ist von 2 Hochblättern umhüllt.

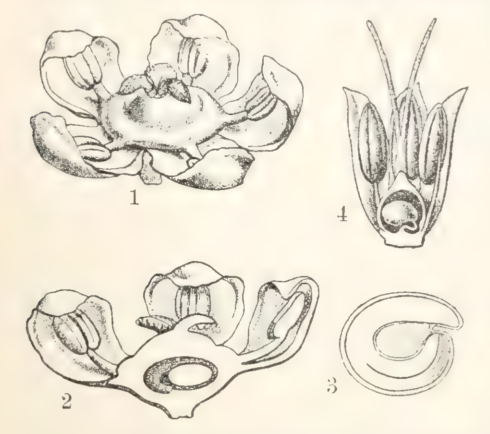


Fig. 34. Chenopodiaceae. 1 bis 3 Beta vulgaris. 1 Blüte; 2 Dieselbe durchschnitten; 3 Samen durchschnitten. 4 Blüte von Salsolo Soda durchschnitten. Vergrößert. (Nach Wettstein.

eine wichtige Nutzpflanze ist Beta vulgaris var. rapa, die Zuckerrübe, besonders in Deutschland und Oesterreich angebaut, ferner Spinacia oleracea, Gemüsepflanze, wahrscheinlich aus dem Orient stammend; eine charakteristische Form ist Haloxylon ammodendron, Saxaul, 1 bis 6 m hoher Krüppelbaum in den Wüsten Persiens und Turkestans.

Amarantaceae. Im Blütentypus den Chenopodiaceen ähnlich, das Perigon der strahligen Blüten ist fünfgliederig; die Staubblätter sind oft mehr oder weniger zu einer Röhre verwachsen, zwischen ihnen nebenblattartige Zipfel; der Fruchtknoten ist einfächerig, mit einer bis mehreren Samenanlagen; charakteristisch ist die trockenhäutige Beschaffenheit des oft buntgefärbten Perigons, sowie der Hochblätter, die nach dem Verblühen stehen bleiben. Die Amarantaceen meist krautige Gewächse mit Rispen oder ähren- oder köpfchenförmigen Blütenständen; fast ganz tropisch, besonders in Südamerika und Ostindien.

Einige Arten von Amarantus sind Zierpflanzen (Fuchsschwanz); ferner Celosia cristata, Hahnenkamm, mit flacher, verbänderter (fasziierter) Blütenstandsachse.

Nyctaginaceae. Die Familie ist charakterisiert durch das verwachsenblättrige, oft korollinische und röhrige oder trichterige Perigon; der untere Teil bleibt nach der Blüte um den Fruchtknoten stehen und umschließt ihn eng; so entsteht die Scheinfrucht des Anthokarps; ein Carpell bildet einen einfächerigen Fruchtknoten mit einer grundständigen Samenanlage; um die Basis einer bis mehrerer Blüten sind Hochblätter kelchartig vereint.

Bei Bougainvillea umschließt die rosenrote, dreiblätterige Hülle drei Blüten, Bougainvillea spectabilis, in wärmeren Ländern viel kultiviert; Mirabilis jalapa, Wunderblume, schöne Zierpflanze, in Mexiko heimisch, eine Blüte in der kelchartigen Hülle.

Phytoiaccaceae. Die meist strahligen und zweigeschlechtlichen Blüten haben ein kelchartiges oder gefärbtes Perigon; Staubblätter in der gleichen Zahl wie die Perigonblätter bis viele; Carpelle nur eines oder 4 bis 10, die frei oder untereinander zu der entsprechenden Zahl von Fächern verwachsen sind, zu jedem ein Griffel und eine Samenanlage; Kräuter oder Holzgewächse mit traubigen Blütenständen; meist in wärmeren Ländern heimisch.

Phytolacca mit Beerenfrucht, Phytolacca decandra, Kermesbeere, der Saft der schwarzroten Früchte dient zum Färben; Rivina, im tropischen Südamerika, Blüten mit einem Carpell.

Aizoaceae. Die Blüten haben typisch ein einfaches Perigon, doch kommt es vor, daß, wenn viele Staubblätter vorhanden sind, die äußeren blumenblattartig werden, so daß die Hülle heterochlamydeischen Charakter gewinnt; der Fruchtknoten ist oberständig oder unterständig, gefächert; die Samenanlage an zentralwinkelständigen Plazenten oder die Plazenten durch späteres Wachstum nach der Basis oder der Wand der Fächer verschoben (Mesembryanthemum).

Mollugo, Glinus, Kräuter mit bis zum Grund gespaltenem Perigon; Tetragonia und Mesembryanthemum, Perigon mit kürzerer oder längerer Röhre; Tetragonia expansa, Neuseeländischer Spinat, in Ostasien, Polynesien, Australien und Südamerika; Mesembryanthemum, artenreiche Gattung in Südafrika, mit einigen Arten bis zum Mediterrangebiet, charakteristisch xerophil, niederliegend krautig oder halbstrauchig, mit ansehnlichen, weiß, gelb oder rosa gefärbten Blüten mit vielen Staubblättern.

Portulaccaceae. Die Blüten sind

heterochlamydeisch, mit zwei Kelchblättern und 4 bis 5 hinfälligen Petalen; der oberständige oder halbunterständige Fruchtknoten ist einfächerig, die Samenanlagen stehen an einer grundständigen Plazenta; Kräuter oder Halbsträucher, meist in Amerika.

Montia fontana, kleines Sumpfkraut, weit über die Erde verbreitet; Portulacca, tropische und subtropische Gemüsepflanzen.

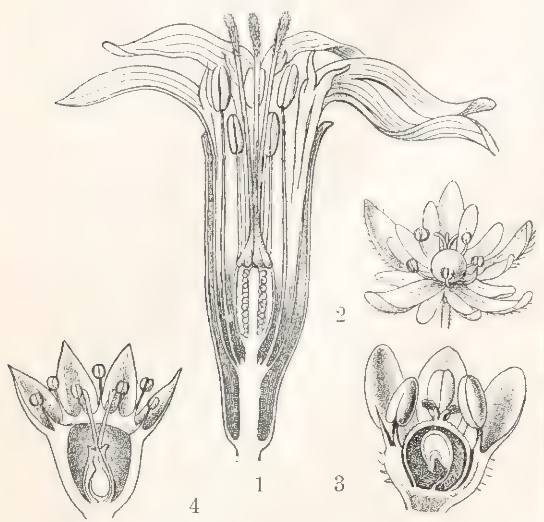


Fig. 35. 1 Blüte von Silene nutans; 2 Blüte von Stellaria media; 3 Blüte von Scleranthus annuus; 4 Blüte von Herniaria glabra. 1, 3 und 4 durchschnitten. Alle vergrößert. Nach Wettstein.

Basellaceae. Blüten heterochlamydeisch, mit zwei Kelchblättern; oberständiger Fruchtknoten mit einer grundständigen Samenanlage.

Windende Kräuter; Basella rubra, Gemüsepflanze in Ostindien, Boussaingaultia im tropischen Amerika.

Caryophyllaceae. Die Blüten sind heterochlamydeisch, mit gefärbter Korolle oder selten bei Abort der letzteren apopetal;

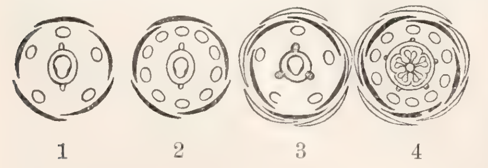


Fig. 36. Schematische Uebersicht der Blütendiagramme der Caryophyllaceae. 1 Paronychia spec; 2 Scleranthus annuus; 3 Corrigiola litoralis; 4 Viscaria viscosa.

die Kelchblätter sind frei oder zu einer Röhre verwachsen, im letzteren Falle die Blumenblätter häufig genagelt; Staubblätter meist zehn in zwei Kreisen; der Fruchtknoten ist einfächerig mit freier grundständiger Plazenta mit meist vielen gekrümmten Samenanlagen oder unvollkommen gefächert; die Frucht ist meist eine sich mit Zähnen öffnende Kapsel. Die Caryophyllaceen sind gewöhnlich krautige Gewächse mit gegenständigen Blättern und reichblütigen Infloreszenzen; sie sind über die Erde verbreitet, aber besonders in den gemäßigten Gebieten entwickelt.

In der Unterfamilie der Silenoideae sind die Kelchblätter verwachsen; die Blütenblätter sind meist genagelt, häufig mit den Staubblättern und dem Fruchtknoten zusammen durch einen säulenförmigen Fuß vom Kelch getrennt; Agrostemma githago, Kornrade, Europa; Silene; Lychnis; Gypsophila, besonders mediterran; Dianthus, Nelke, Dianthus caryophyllus, mediterran, in vielen Varietäten kultiviert, Saponaria, Seifenkraut, besonders mediterran. In der Unterfamilie der Alsinoideae sind die Kelchblätter frei, die Blütenblätter nicht oder kurz genagelt; Stellaria media, Vogelmiere, kosmopolitisch; Cerastium, Hornkraut; Alsine, in den gemäßigten Gebieten der nördlichen Halbkugel.

Die Früchte der 3. Unterfamilie, der Paronychinen, sind Nüßchen. Die Blüten sind unscheinbar, weil die Krone unansehnlich oder reduziert ist. Die Staubblätter sind bei Scleranthus noch in der Zehn-Zahl vorhanden, bei Paronychia sind nur noch die Kelchstamina erhalten.

13. Reihe Opuntiales. Die Reihe steht in phylogenetischen Beziehungen zu den Aizoaceae und wird nur von der Familie der Cactaceae gebildet. Die Blüten, häufig groß und schön gefärbt, sind meist strahlig, zweigeschlechtlich; die spiralig gestellten Kelch- und Blumenblätter sind meist in großer Anzahl vorhanden und gehen ohne scharfe Grenze ineinander über; die Blütenachse ist mehr oder weniger lang röhrig; Staubblätter viele an der Achsenröhre; der Fruchtknoten ist unterständig, einfächerig, mit vielen Samenanlagen an wandständigen Plazenten; die Frucht ist eine fleischige Beere. Die Cactaceen sind Xerophyten von extremer Anpassung. Nur selten sind dauernde Blätter entwickelt (Peireskia), sonst sind nur kleine Schuppenblätter vorhanden, die bald abfallen; die Blattpolster bilden Warzen oder zusammenhängende Rippen am Stamm; auf ihnen häufig filzige Behaarung und starke Dornen (metamorphosierte Blätter vgl. den Artikel „Xerophyten"). Die xerophilen Eigenschaften der Cactaceen machen es ihnen möglich, die trockensten Gebiete zu bewohnen; sie sind fast nur im wärmeren Amerika heimisch (afrikanisch ist Rhipsalis cassytha), und zwar vorzugsweise im regenarmen Gebiet von Mexiko und in den trockenen Campos von Brasilien; viele Arten kommen auch in den Anden vor, wo sie teilweise Winterkälte vertragen können.

Säulenförmige Stämme finden sich bei der Gattung Cereus, teilweise von riesigem Wuchs,

bis 20 m Höhe; bei Echinocactus ist der Stamm kugelig oder keulenförmig, gerippt, auch hier teilweise bedeutende Dimensionen, bis gegen 2 m Durchmesser; bei Mamillaria ist der Stamm ähnlich, aber mit Warzen besetzt; Opuntia, mit blattartigen Gliedern, Opuntia ficus indica, Feigencactus, aus Amerika in die wärmeren Länder der alten Welt eingeführt, im Mittelmeergebiet völlig heimisch geworden.

14. Reihe Ranales. Die Blüten sind vorwiegend heterochlamydeisch; charakteristisch ist der spiralige oder spirozyklische Bau der Blüten, ferner die Apokarpie des Gynäceums (die Carpelle sind frei und nicht zu einem gemeinsamen Fruchtknoten verwachsen); meist viele Staubblätter. Diese Merkmale weisen den Ranales die Stellung am Anfang der Reihen mit typisch heterochlamydeischen Blüten an; es sind in der Reihe starke Progressionen vorhanden, schließlich Unterständigkeit des Fruchtknotens und Reduktion der Zahl der Carpelle bis auf eines.

Nymphaeaceae. Die meist großen und schön gefärbten Blüten haben gewöhnlich einen vierblätterigen Kelch und zahlreiche Petalen, nur selten ist eine vielblätterige Blütenhülle vorhanden; Staubblätter zahlreich; Carpelle selten frei, meist zu einem Fruchtknoten verwachsen, mit einer bis vielen Samenanlagen an der Innenfläche; Wasser- und Sumpfgewächse mit einzelstehenden Blüten und häufig großen schwimmenden Blättern.

Bei Nelumbo sind die Carpelle voneinander frei, dem Blütenboden eingesenkt, Nelumbo nucifera (Nelumbium speciosum), im wärmeren Asien, mit schildförmigen, auf langem Stiel über Wasser stehenden Blättern; bei Nuphar, Nymphaea und Victoria sind die Carpelle vereint und das Gynäceum in verschiedener Art mit den Blütenteilen verwachsen; bei Nuphar sind Kelch und Krone vom vielfächerigen Fruchtknoten frei, auf der nördlichen Hemisphäre, Nuphar luteum in Europa; bei Nymphaea sind die vier Kelchblätter unterständig, frei, die zahlreichen Blumenblätter und Staubblätter dem Fruchtknoten angewachsen, Nymphaea alba in Europa, Nymphaea lotus, weißblühend und Nymphaea coerulea, blaue Lotus, in Afrika, häufig auf Denkmälern der Aegypter dargestellt; bei Victoria sind auch die Kelchblätter mit dem unterständigen Fruchtknoten vereint, Victoria regia, berühmte Wasserpflanze mit riesigen Blättern vom Amazonas, eine zweite Art im Paraguaygebiet.

Ceratophyllaceae. Die kleine Familie der Ceratophyllaceae wird hier angereiht, die Verwandtschaft ist zweifelhaft; es sind Wasserpflanzen mit schmalen quirlig gestellten Blättern und eingeschlechtlichen Blüten mit 9 bis 12-blätterigem Perigon; Staubblätter 12 bis 16; Carpell 1 mit einer herabhängenden Samenanlage.

Ceratophyllum, von weiter Verbreitung, mit drei Arten.

Ranunculaceae. Die Blüten sind strahlig oder zygomorph, mit spiraliger oder ins zyklische übergehender Anordnung der Teile, mit meist vielen Staubblättern; die Blütenhülle ist meist einfach und korollinisch, sie wird vermehrt durch Umbildung der äußeren Staubblätter in petaloide Honigblätter oder durch kelchartige Ausbildung der Hochblätter (z. B. Hepatica triloba); Carpelle meist frei, in der Zahl wechselnd, mit einer bis vielen Samenanlagen; die Einzelfrüchtchen springen entweder an der Bauchnaht auf (Balgfrucht) oder öffnen sich nicht (Schließfrucht); die Ranunculaceen sind meist Stauden mit abwechselnden Blättern, selten Kräuter oder Holzgewächse; ihre Verbreitung geht vorzugsweise über die nördlichen extratropischen Gebiete.



Fig. 37. Blüte von Ranunculus sceleratus. a ganz, b im Längsschnitt. Vergrößert. Nach Baillon.

Gattungen mit Balgfrüchtchen: Paeonia, Pfingstrose; Caltha, Sumpfdotterblume; Helleborus niger, Nieswurz, Christblume, subalpin und alpin; mit gespornten Honigblättern Aquilegia, Akelei, Delphinium, Rittersporn und Aconitum, Eisenhut. Gattungen mit einsamigen Schließfrüchtchen: Anemone, Anemone nemorosa, Windröschen, in Wäldern; Hepatica triloba, Leberblümchen; Clema-

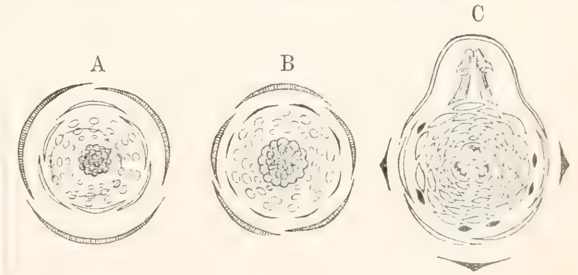


Fig. 38. Blütendiagramme von Ranunculaceen. A Anemone nemorosa. Die Linien im Andröceum bezeichnen die Fünfer- und Achterzeilen. B Adonis autumnalis. C Aconitum napellus. Nach Eichler.

tis, Waldrebe, mit zahlreichen Arten in den Tropen und gemäßigten Gegenden; Ranunculus, Hahnenfuß, große Gattung, besonders nördlich extratropisch, mit 5 kelchartigen Blütenhüllblättern und etaloiden Honigblättern.

Berberidaceae. Die Blüten sind zyklisch und zwitterig, mit 2 bis 3-gliederigen Quirlen, die Blütenhülle ist häufig in Kelch und Krone geschieden, zwischen Petalen und Staubblättern vielfach Honigblätter; Staubblätter meist in zwei Quirlen; der einfächerige Fruchtknoten von einem Carpell gebildet, mit mehreren bis vielen Samenanlagen.

Berberis, über 70 Arten, besonders in Nordamerika und andin, mit reizbaren Staubblättern, Blätter der Langtriebe in Dornen um-

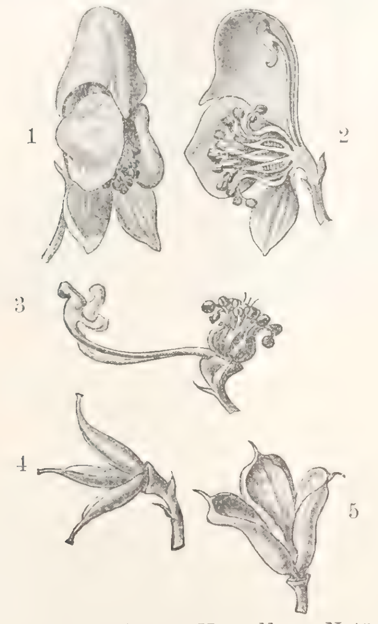


Fig. 39. Aconitum Napellus. Natürliche Größe. 1 Einzelblüte schräg von vorn. 2 Einzelblüte längsdurchschnitten. 3 Die zu Nektarien umgebildeten Staubblätter und das Andröceum nach Entfernung des Perigons. 4 Frucht aus drei apokarpen Fruchtblättern. 5 Frucht, aufgesprungen.

gebildet; Mahonia, mit gefiederten Blättern, besonders Nordamerika und Zentralamerika, Mahonia aquifolium, viel in Kultur.

Podophyllum peltatum, in Nordamerika, Staude mit handförmigen Blättern (enthält Podophyllin).

Mit den Berberidaceen verwandt die kleine Familie der Lardizabalaceae, besonders durch die größere Zahl der freien Carpelle (meist 3) mit zahlreichen Samenanlagen unterschieden. Schlingende Holzpflanzen mit handförmig zusammengesetzten Blättern, in Indien und Ostasien heimisch. Akebia quinata, in Japan, häufig kultiviert.

Menispermaceae. Die Blüten sind diöcisch, mit dreigliederigen Quirlen, mit einfacher Hülle oder mit Kelch und Blumenkrone; Carpelle drei, mit je einer an der Bauchnaht hängenden Samenanlage, getrennt; Staubblätter frei oder verwachsen. Die Menispermaceae sind meist schlingende Holzgewächse, die fast ganz auf die Tropen beschränkt sind; viele Früchte giftig.

Cissampelos; Cocculus, Cocculus leaeba in Vorderasien und Nordafrika; Anamirta cocculus, indomalayisch, liefert Kokkelskörner.

Magnoliaceae. Die Blüten sind spiralig oder spirozyklisch, häufig groß und ansehnlich; die Blütenhülle ist von spiralig oder wirtelig gestellten Blättern gebildet, häufig zahlreiche Blätter korollinisch oder die äußeren kelchartig; die Staubblätter stehen zahlreich spiralig, ebenso die Carpelle an meist verlängerter Achse; die einzelnen Carpelle werden zu trocknen, aufspringenden Früchtchen oder zu Schließfrüchtchen. Die Magnoliaceae sind Holzgewächse, die im tropischen und subtropischen Amerika und Asien heimisch sind.

Magnolia, mit großen Blüten, Blätter mit großen, intrapetiolaren Nebenblättern, in Ostasien und im atlantischen Nordamerika; Liriodendron tulipifera, Tulpenbaum, im atlantischen Nordamerika; Ilicium verum, Sternanis, in China.

Calycanthaceae. Die Blüte ist spiralig, mit zahlreichen petaloiden Hüllblättern und vielen Staubblättern; Carpelle mit je 2 Samenanlagen, etwa 20, frei im Grunde der hohlen Blütenachse; Sträucher mit gegenständigen Blättern; wenige Arten in Ostasien und Nordamerika; der wohlriechende Calycanthus floridus, in Nordamerika, viel kultiviert.

Anonaceae. Die Blüten sind spirozyklisch; es sind meist drei dreigliederige Quirle von Hüllblättern vorhanden, deren äußerster meist kelchartig ist; die meist zahlreichen Staubblätter sind spiralig angeordnet; die Carpelle sind allermeist frei, nur bei Monodora zu einem einfächerigen Fruchtknoten vereint; im Blütenbau kommen die Anonaceen der Magnoliaceen nahe, haben auch wie diese im Parenchym Oeldrüsen; sie unterscheiden sich aber durchgreifend durch das zerklüftete Nährgewebe des Samens. Die Anonaceen sind Holzgewächse der Tropen mit einfachen Blättern, artenreiche Familie.

Anona, fast ausschließlich im tropischen Amerika heimisch, die Carpelle bilden mit der Blütenachse eine fleischige Frucht, Anona squamosa, Sugar-Apple, überall kultiviert; bei anderen Gattungen bleiben die trockenen Früchtchen voneinander frei, z. B. Xylopia, mit länglichen Früchtchen, Xylopia aethiopica, Mohrenpfeffer, Gewürz, im tropischen Afrika; Cananga odorata, mit wohlriechenden Blüten, Ilang-Ilang.

Myristicaceae. Die Blüten sind diöcisch und haben ein einfaches, dreilappiges, verwachsenes Perigon; die Staubblätter sind in größerer Zahl mit ihren Filamenten zu einer Röhre verwachsen; ein Karpell mit einer fast grundständigen umgewendeten Samenanlage. Die Myristicaceae sind Holzgewächse der Tropen, besonders in Asien.

Myristica fragrans, Muskatbaum, auf den Molukken heimisch, viel in den Tropen kultiviert; Frucht mit fleischiger Schale, die Samen (Muskatnüsse) mit zerklüftetem Endosperm, der zerschlitzte Arillus als Macis, Muskatblüte verwendet.

Monimiaceae. In den Tropen verbreitete Holzgewächse mit eingeschlechtlichen Blüten; die Blütenachse verschiedenartig ausgebildet, scheibenförmig oder becherförmig; die freien Carpelle mit je einer Samenanlage.

Mollinedia, Siparuna, artenreich im tropischen Amerika.

Lauraceae. Die Lauraceae stellen die fortgeschrittenste Familie der Reihe dar; die Blütenachse ist becherförmig oder schüsselförmig, so daß die Insertion der Blütenhülle und der Staubblätter perigynisch wird, der Fruchtknoten ist einfächerig mit einer hängenden anatropen Samenanlage; die Blüten sind dreigliederig, homoiochlamydeisch mit zwei Kreisen gleicher Perigonblätter; Staubblätter in mehreren Kreisen, die Antheren öffnen sich mit Klappen; die Frucht ist beeren- oder steinfruchtartig, von der Achse am Grunde umgeben oder mit ihr mehr oder weniger verwachsen. Die Lauraceae sind fast immer Holzpflanzen mit ledreigen einfachen Blättern; zahlreiche Arten in den wärmeren Ländern, eine Reihe von ihnen haben wegen des Vorkommens von ätherischen Oelen Bedeutung.

Cinnamomum, Baum mit axillären Blütenrispen, Cinnamomum ceylanicum liefert die Zimmetrinde, auf Ceylon heimisch, kultiviert, Cinnamomum cassia liefert chinesischen Zimmet, Cinnamomum camphora, in Japan, liefert Kampher; Persea gratissima, im tropischen Amerika heimisch, kultiviert, liefert Obst (Avocato-Birnen); Laurus nobilis, Lorbeer, mediterran.

15. Reihe Rhoeadales. Die Blüten sind zyklisch, heterochlamydeisch, meist zweigliederig, strahlig oder zygomorph, mit oberständigem, aus zwei bis mehreren Carpellen zusammengesetztem Fruchtknoten. Der Anschluß an die Ranalesreihe ist bei den Papaveraceen zu suchen.

Papaveraceae. Die Blüten sind strahlig oder zygomorph mit 2 (meist bald abfälligen) Kelchblättern und vier Petalen (bei einigen Gattungen ist die Dreizahl herrschend, bei Bocconia und Macleya fehlen die Petalen); Staubblätter meist viele, seltener nur zwei (dann geteilt); Fruchtknoten aus zwei bis vielen Carpellen gebildet, einfächerig, mit wandständigen Plazenten; meist sind viele Samenanlagen vorhanden (bei Bocconia nur eine, bei Fumaria kommt nur eine zur Entwickelung). Die Papaveraceae sind Kräuter oder Stauden, häufig mit Milchsaft; ihre reichste Entwickelung finden sie im Mittelmeergebiet und im pazifischen Nordamerika.

In der Unterfamilie der Papaveroideae sind die Blüten ungespornt. Eschscholtzia, mit zahlreichen gelbblühenden Arten in Kalifornien, Zierpflanzen; Chelidonium, Fruchtknoten aus

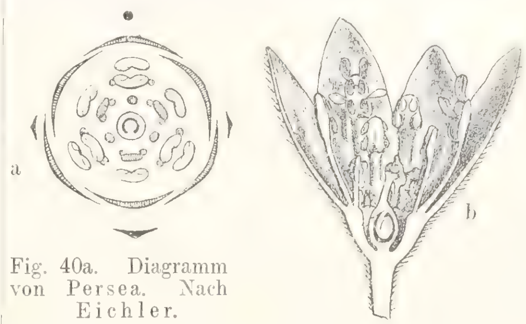


Fig. 40a. Diagramm von Persea. Nach Eichler.

Fig. 40b. Blüte von Cinnamomum zeylanicum. Durchschnitten. Nach Wettstein.

zwei Carpellen, gelber Milchsaft, Chelidonium majus, Schöllkraut, in Europa und Asien; Papaver, Mohn, Carpelle bis 20, einen einfächerigen Fruchtknoten bildend, mit strahliger Narbe, die Frucht öffnet sich durch Poren oder kurze Klappen, besonders in Südeuropa entwickelt, Papaver somniferum, im Orient und in Indien angebaut, liefert im eingetrockneten Milchsaft der Kapselwandung Opium; Glaucium, gelbblühend. In der Unterfamilie der Fumarioideae sind die Blüten gespornt; Staubblätter zwei, vor den äußeren Kronblättern, dreiteilig, der mittlere Abschnitt mit dithecischer, die seitlichen mit monothecischer Anthere. Corydalis, Lerchensporn, nur ein Kronblatt gespornt, mehrsamige Kapsel, artenreich besonders in Asien; Fumaria, Erdrauch, mit einsamiger Schließfrucht, besonders mediterran; Dicentra, Blüte mit zwei gespornten Kronblättern, Dicentra spectabilis, Zierpflanze aus Ostasien.



Fig. 41a. Blütendiagramm von Glaucium. Nach Eichler.



Fig. 41b. Diagramm von Corydalis cava Nach Eichler.

Capparidaceae. Die Familie steht in enger Verwandtschaft zu den Cruciferen;

Blüten strahlig oder zygomorph, mit vier Kelchblättern und vier Petalen; innerhalb der Blütenhülle ist ein ring- oder schuppenförmiger Diskus entwickelt; Staubblätter vier oder durch Spaltung vermehrt (sechs bis viele); Carpelle zwei oder mehrere; die Frucht ist eine Kapsel oder Beere; ein charakteristisches Merkmal ist für die Capparidaceae, daß der Fruchtknoten durch ein (häufig langes) Achsenglied (Gynophor) in die Höhe gehoben wird; seltener werden auch zugleich die Staubblätter mit in die Höhe gehoben. Die Capparidaceen sind Kräuter oder kleine Holzgewächse, nicht selten kletternd; sie sind in wärmeren Ländern zu Hause.

Capparis, artenreich, Capparis spinosa, mediterran, liefert in den Blütenknospen die Kappern; Cleome, Polanisia.

Cruciferae. Die Blüten sind zwitterig,

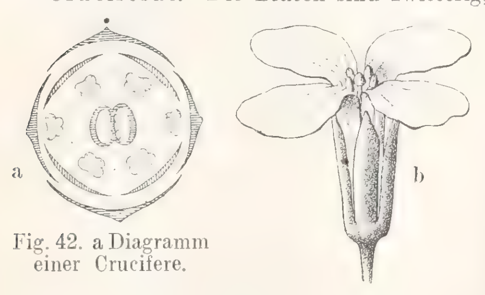


Fig. 42. a Diagramm einer Crucifere.

b Blüte von Brassica nigra. Vergrößert. Nach Wettstein.

strahlig (selten zygomorph, z. B. Iberis); im allgemeinen herrscht in der artenreichen Familie eine große Cleichförmigkeit im Blütenbau; Kelchblätter vier, in zwei Kreisen, Blumenblätter vier damit abwechselnd, in einem Kreise, meist genagelt; Staubblätter in zwei Kreisen, deren äußerer von zwei kürzeren, deren innerer von vier längeren Staubblättern gebildet wird; am Grunde der Staubblätter finden sich am Blütenboden Honigdrüsen (Saftdrüsen) und zwar stehen zwei lateral zur Seite der kurzen Staubblätter; dazu kommen häufig noch ein bis zwei mediane Drüsen vor den langen Staubblättern; der Fruchtknoten wird von zwei Carpellen gebildet, an deren Verwachsungsrändern die Samenanlagen stehen; durch eine falsche (d. h. nicht von den die Samenanlagen tragenden Carpellrändern gebildete) Scheidewand wird der Fruchtknoten zweifächerig; die Frucht ist eine Schote (mehrmals länger als breit) oder ein Schötchen (nicht viel länger als breit); sie öffnet sich, indem die Wände sich klappig von unten nach oben von der Scheidewand, an der die Samenanlagen stehen bleiben, ablösen; seltener sind Schließfrüchte ausgebildet; Samen ohne Nährgewebe, vom Keimling mit den dicken Cotyledonen ausgefüllt (im Gegensatz zu den Papaveraceen); der Embryo ist gekrümmt und zwar können Würzelchen und Keimblätter eine verschiedene Lage zueinander einnehmen, eine Tatsache, die zur Systembildung in der Familie benutzt worden ist. Die beiden Hauptformen sind der rückenwurzelige Keim (die Lage notorrhiz), indem der Embryo so gekrümmt ist, daß das Würzelchen dem Rücken des einen Keimblattes anliegt, und dann der seitenwurzelige Keim (die Lage pleurorrhiz), indem das Würzelchen der Seitenkante der beiden Keimblätter anliegt. Die Cruciferae sind krautartig, einjährig oder ausdauernd, mit meist wechselständigen Blättern und traubigen Blütenständen ohne Deckblätter; die große Familie ist über die Erde verbreitet, aber stärker auf der nördlichen Hemisphäre und zwar besonders reich im Mediterrangebiet entwickelt. Das Diagramm weist große Aehnlichkeit mit dem der Papaveraceae-Fumarioideae auf.

Die Einteilung nach A. v. Hayek:

A. Thelypodieae. Diese Gruppe schließt sich am nächsten an die Capparidaceae an, indem die linealische Schote mit einem Gynophor versehen ist; die Honigdrüsen sind stark entwickelt und fließen oft zu einem Ring zusammen; die Narbe ist ringsum gleich entwickelt. Wenige Gattungen in Nordamerika und Zentralasien; Stanleya, hochwüchsige Arten im westlichen Nordamerika, ebenso Thelypodium.

B. Arabideae. Das Gynophor fehlt; Frucht häufig eine linealische Schote; mediane und laterale Honigdrüsen vorhanden, oft zu einem Ring verschmolzen; die Narbe ist mehr oder weniger zweilappig. Sisymbrium, Kräuter mit zweiklappiger linealischer Schote, ebenso Cardamine, eine vorwiegend boreale Gattung, Cardamine pratensis, Wiesen-

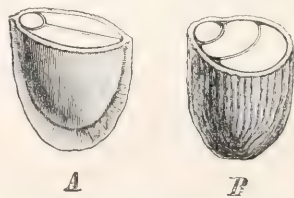


Fig. 43. Querdurchschnittene Cruciferen-Samen, die die verschiedene Lage des Würzelchens zu den Keimblättern zeigen. A. Cheiranthus, seitenwurzelig; B. Sisymbrium, rückenwurzelig. Nach Baillon.

schaumkraut; Nasturtium, Nasturtium officinale, Brunnenkresse; Armoracia, in Osteuropa, Meerrettig; Arabis, besonders mediterran und boreal; Isatis, Frucht ein hängendes, nicht aufspringendes Schötchen, Isatis tinctorea, Waid, Farbpflanze, von Zentralasien bis Süd- und Mitteleuropa.

C. Alysseae. Frucht linealisch oder schötchenförmig, meist zweiklappig aufspringend; die medianen Honigdrüsen fehlen stets; Narbe deutlich zweilappig; Haare meist ästig. Mit linealischer Schote: Cheiranthus, mediterran,

Cheiranthus cheiri, Goldlack; Hesperis, Hesperis matronalis mit violetten Blüten; Matthiola, mediterran, Matthiola incana Levkoje; mit rundlicher, vom Rücken flachgedrückter Schote Lunaria, Lunaria biennis in Südosteuropa, mit silberweißen Scheidewänden der Kapsel; mit kurzen rundlichen Schötchen Alyssum, artenreich besonders im Mittelmeergebiet, und Draba, mit vielen Arten besonders in den Gebirgen der ganzen Erde; Anastatica, mit elliptischer, nicht aufspringender Frucht, Anastatica hierochuntica, Rose von Jericho, die fruchttragende Pflanze krümmt austrocknend die Aeste zusammen und breitet sie bei Befeuchtung wieder aus, in Wüsten des östlichen Mediterrangebietes.

D. Brassiceae. Die verschieden gestaltete Frucht ist mit einem deutlichen, oft mächtig entwickelten Schnabel versehen; mediane Honigdrüsen meist vorhanden; Haare einfach. Mit linealischer Frucht, die kugelige Samen enthält:

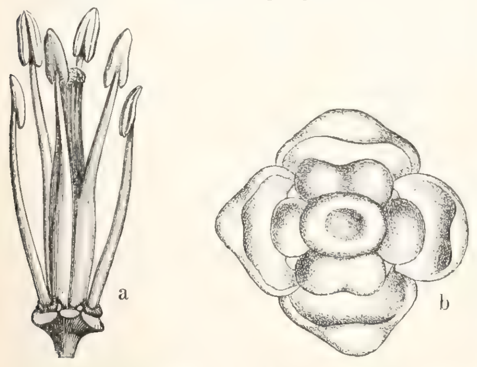


Fig. 44. a Cardamine pratensis. Androeceum und Gynoeceum. Nach Baillon. b Anlage einer Cruciferen-Blüte von oben gesehen. Vergrößert. Nach Wettstein.

Brassica, Brassica oleracea, Kohl, wild an den Küsten Nordeuropas, in zahlreichen Spielarten kultiviert (Kohlsorten und Rüben), Brassica nigra, schwarzer Senf, Brassica napus, Raps, Brassica campestris (Brassica rapa) Rübsen; Sinapis arvensis, Ackersenf, Unkraut; stärker in einen Schnabel und den Klappenteil sind die Früchte bei folgenden Gattungen gegliedert: Raphanus, der Klappenteil ganz reduziert, nur der nicht aufspringende Schnabel (Stylarteil) Samen tragend, Raphanus raphanistrum, Hederich, Ackerunkraut, Raphanus sativus, Rettich; Cakile, mit zweigliederiger, nicht aufspringender Frucht, oberes Glied mit einem aufrechten, unteres mit einem hängenden Samen, Cakile maritima, halophile Küstenpflanze.

E. Lepidieae. Frucht seitlich zusammengedrückt, mit meist geflügelten oder gekielten Klappen; Narbe zweilappig; mediane Honigdrüsen klein oder fehlend. Lepidium, mit rundlichen, schmal geflügelten oder gekielten Schötchen. Die Gattung ist weit über der Erde verbreitet; Biscutella, mit ausgerandeten, breit geflügelten Schötchen, in Süd- und Mitteleuropa; ähnlich im Fruchtbau Iberis, besonders in Südeuropa; Cochlearia, mit kugeligen oder ellipsoidischen Früchtchen, besonders in nördlichen Gebieten; Thlaspi; Capsella, Schötchen dreieckig verkehrt-herzförmig, zweiklappig aufspringend, Capsella bursa pastoris, Hirtentäschel.

F. Pringleeae. Frucht eine stielrunde Schote ohne Scheidewand; zwei Paar laterale und je eine mediane Honigdrüse; Narbe kugelig. Pringlea antiscorbutica, Kerguelenkohl auf den Kerguelen, eine starkwüchsige Pflanze mit dickem Rhizom und großen Blättern.

Resedaceae. Die Blüten sind zygomorph durch stärkere Entwickelung der Rückseite der Blüte und besonders eines als Diskus ausgebildeten exzentrischen Nectariums zwischen der Blütenhülle und den Staubblättern; Kelchblätter vier bis acht; Blumenblätter entweder ganz fehlend oder bis acht; Staubblätter viele; mehrere Carpelle bilden einen einfächerigen Fruchtknoten, der an der Spitze geöffnet ist, da die Carpelle nicht völlig zusammenschließen. Die Resedaceae sind Kräuter mit spiraligen Blättern und traubigen Blütenständen; sie sind meist im Mittelmeergebiet heimisch.

Reseda odorata, wohlriechende Zierpflanze. Hier schließt sich die kleine Familie der Moringaceae an; baumförmige Arten mit gefiedertem Laub, die in Afrika und Vorderindien heimisch sind, mit 5-gliederigen, zygomorphen Blüten; die drei Carpelle stehen auf kurzem Gynophor und bilden einen einfächerigen Fruchtknoten mit parietalen Plazenten mit vielen Samenanlagen; Kapsel mit geflügelten Samen; Moringa.

16. Reihe Sarraceniales Die Blüten sind haplochlamydeisch oder heterochlamydeisch; der Fruchtknoten wird von drei bis fünf Carpellen gebildet, er ist ungefächert oder gefächert, mit zahlreichen Samenanlagen. Alle Vertreter der Reihe haben Blätter, die zum Insektenfang ausgerüstet sind (insektivore Pflanzen).

Sarraceniaceae. Die Blüten haben ein einfaches fünfblätteriges Perigon oder fünf Kelch- und Blumenblätter; der Fruchtknoten ist gefächert, mit vorspringenden Plazenten. Die Sarraceniaceen sind krautige Pflanzen mit schlauchförmigen Blättern (vgl. den Artikel „Insektivoren"). Die wenigen Arten sind in Amerika heimisch.

Sarracenia purpurea, mit schirmförmig erweitertem Griffel, in Sümpfen des atlantischen Nordamerika.

Nepenthaceae. Die Blüten stehen in Trauben, sie sind diöcisch, mit vierblätterigem Perigon; die Staubblätter (4 bis 16) sind in eine Säule verwachsen; der Fruchtknoten ist vierfächerig. Die Nepenthaceae sind Blattklimmer mit großen, spiralig gestellten Blättern; der Blattgrund ist spreitenartig ausgebildet, dann folgt der meist lange und mehr oder weniger rankende Stiel, die Spreite ist in ein becherförmiges oder kannenförmiges

Gebilde umgewandelt, dessen nach oben gerichtete Mündung von einem Deckel bedeckt wird.

Nepenthes, die Gattung ist mit 40 Arten besonders in Malesien entwickelt und erreicht nach Westen hin Madagaskar.

Droseraceae. Die Blüten stehen in wickeligen Infloreszenzen; sie sind heterochlamydeisch, mit 5 bis 20 Staubblättern; der Fruchtknoten ist einfächerig mit parietalen Plazenten, die öfters nur am Grunde Samenanlagen tragen. Die Droseraceae sind meist kleine Kräuter, deren Blätter mit Digestionsdrüsen versehen sind.

Drosera, mit 80 Arten weit verbreitet, viele in Australien; Kräuter mit rosettig gestellten rundlichen oder spateligen Blättern; die randständigen Drüsen sind lang gestielt (Tentakeln), die Spreitendrüsen sind ungestielt; Drosera rotundifolia, Sonnentau, und einige andere Arten in Torfmooren Europas; Drosophyllum lusitanicum, in Portugal, die schmale Blattspreite mit sitzenden Drüsen; Dionaea muscipula, Venus-Fliegenfalle, auf Mooren in Karolina (s. Insektenfresser); Aldrovanda vesiculosa, eine Wasserpflanze, deren Blätter ebenfalls sensible Haare besitzen; sie ist durch Europa und Asien bis Australien verbreitet. Durch Ausschluß der Gattungen Byblis (Anschluß an die Pittosporaceae) und Roridula (Anschluß an die Ochnaceae vgl. Diels) ist die Familie gut geschlossen.

17. Reihe Rosales. Die Blüten sind meist zyklisch, heterochlamydeisch (selten apopetal), hypogynisch bis epigynisch, strahlig oder zygomorph; die Carpelle sind frei oder vereint.

Podostemonaceae. Die Blüten haben ein einfaches Perigon; Staubblätter mehrere bis viele; Fruchtknoten zweifächerig mit dicker, zentraler Placenta mit vielen Samenanlagen. Die Podostemonaceae sind ausgeprägte Wasserpflanzen (vgl. den Artikel „Wasserpflanzen"), sie gleichen oft den Algen oder den Lebermoosen. Die meisten Arten kommen im tropischen Amerika vor, doch ist die Familie auch in Asien und Afrika vertreten. Die verwandtschaftlichen Beziehungen weisen durch den Bau des Fruchtknotens offenbar auf die Saxifragaceen hin.

Crassulaceae. Die Blüten sind strahlig, meist fünfgliederig, aber auch mit höheren Zahlen (bis 30gliederig); Carpelle meist den Blütenblättern gleichzählig (Isomerie des Gynoeceums), frei oder schwach verwachsen; Samenanlagen meist viele an der Bauchnaht. Die Crassulaceea sind krautige oder halbstrauchige Gewächse mit dicken fleischigen Blättern (Blattsukkulenten, Fettpflanzen), und mit cymösen Blütenständen. Die Familie ist fast über die ganze Erde verbreitet; besonders reich ist ihre Entwickelung in Südafrika.

Sedum, mit vielen Arten in der nördlichen gemäßigten Hemisphäre, Sedum acre, Mauerpfeffer; Sempervivum, artenreich (auch viele Bastarde) in den Gebirgen Europas und Vorderasiens, Sempervium tectorum, Hauswurz; Crassula, über 100 Arten meist in Südafrika; Bryophyllum calycinum, in den Tropen verbreitet, ist dadurch ausgezeichnet, daß sich in den Kerben der Blätter Adventivsprosse entwickeln.

Cephalotaceae. Die Familie wird durch die einzige Art Cephalotus follicularis in den Sümpfen Westaustraliens gebildet; die Pflanze hat eine Rosette, deren untere Blätter kannenförmig sind, an der Mündung mit einem gerippten Ring und Deckel, während die oberen flach sind (vgl. den Artikel „Insektivoren");



Fig. 45. a Sedum telephium. Vergrößert. b im Längsschnitt. (Lehrb.)

die Blüte hat sechs Perigonblätter, zwölf Staubblätter und sechs freie Carpelle mit je einer grundständigen Samenanlage.

Saxifragaceae. Die Blüten sind meist heterochlamydeisch und fünfgliederig (bis auf die Oligomerie des Gynaeceums); Staubblätter in einfachem Kreise oder in zwei Kreisen und dabei Obdiplostemonie, selten viele; Fruchtknoten durch verschiedene Ausbildung der Achse oberständig bis unter-

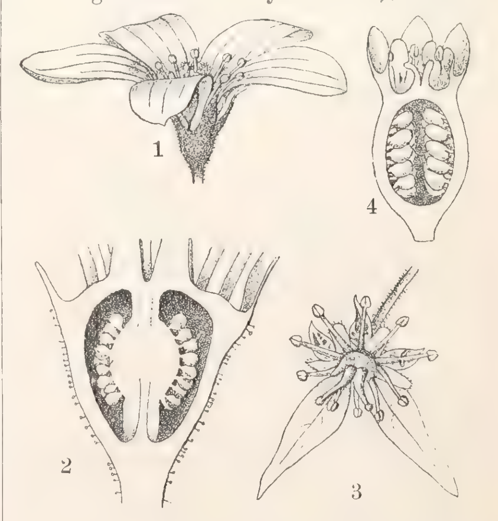


Fig. 46. 1 Blüte von Saxifraga trifurcata. 2 Basaler Teil derselben. Längs durchschnitten. 3 Blüte von Saxifraga sarmentosa. 4 ♀ Blüte von Ribes alpinum. Längsschnitt. Vergrößert. Nach Wettstein.

ständig, meist aus zwei Carpellen gebildet, zweifächerig mit dicken Plazenten mit vielen Samenanlagen, seltener mehr Carpelle; Griffel meist frei und häufig auch der obere Teil der Carpelle. Die Saxifragaceae sind Kräuter oder Holzgewächse mit meist spiraligen Blättern.

Unterfamilie Saxifragoideae: Kräuter; Fruchtblätter zwei, teilweise frei. Saxifraga, Steinbrech, 200 Arten, meist in den Gebirgen der nördlichen gemäßigten Zone, auch andin und arktisch; Parnassia palustris, weitverbreitete Sumpfpflanze; Chrysosplenium, Milzkraut; Heuchera, Nordamerika; Bergenia, großblätterige Zierpflanze aus Zentralasien. Unterfamilie Hydrangeoideae: Holzgewächse mit meist gegenständigen Blättern; Fruchtknoten halb unterständig bis unterständig, zwei- bis fünffächerig; Philadelphus mit vielen Staubblättern, in Asien und Nordamerika, Philadelphus coronarius, Pfeifenstrauch; Hydrangea, die peripherischen Blüten steril, mit petaloiden Kelchblättern, Hydrangea hortensia, Hortensie, in Ostasien heimisch; Deutzia, besonders in Asien. Unterfamilie Escallonioideae: Holzgewächse mit spiraligen Blättern; Blüten mit fünf Staubblättern; Escallonia in Südamerika. Unterfamilie Ribesioideae: Holzgewächse mit spiraligen Blättern und traubigen Blütenständen; der unterständige Fruchtknoten ist einfächerig, die Frucht eine Beere; Ribes, in der nördlich gemäßigten Zone und andin, Ribes rubrum, Johannisbeere, Ribes grossularia, Stachelbeere (Bearbeitung der Gattung Ribes von Janczewski in Bull. Acad. Cracovie 1905/1906). An die in diesem Sinne ziemlich weitgefaßten Saxifrageen schließen sich einige kleinere Familien an, die zu verschiedenen Gruppen der Saxifragaceen in Beziehungen stehen. Wir erwähnen die Pittosporaceae, die sich an die Escallonioideae anschließen; die Blüten sind fünfgliederig, der oberständige Fruchtknoten ist gefächert oder ungefächert; charakteristisch sind schizogene rindenständige Harzgänge; besonders in Australien, Pittosporum selbst in den Tropen der alten Welt verbreitet. Ferner die Cunoniaceae, die durch gegenständige Blätter mit Nebenblättern, sowie durch die regelmäßig zweireihige Stellung der Samenanlagen an den Plazenten von den Saxifragaceen abweichen; Holzgewächse der südlichen Hemisphäre; Weinmannia, besonders andin.

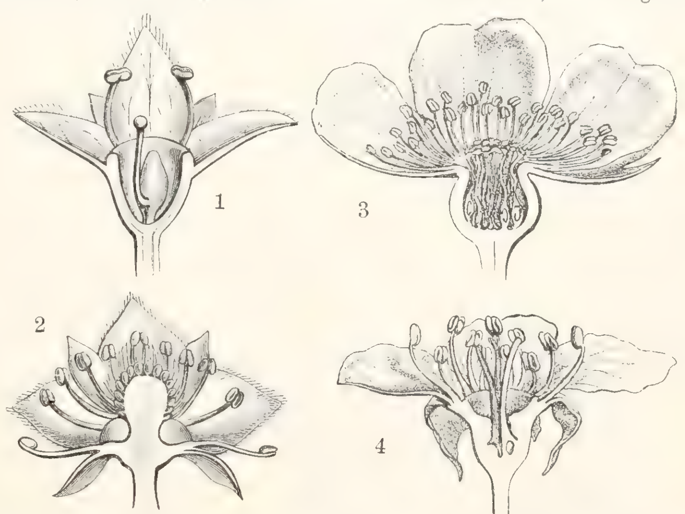


Fig. 47. 1 Längsschnitt durch die Blüte von Alchimilla alpina. 2 Desgl. von Potentilla palustris. 3 Blüte von Rosa spinosissima. 4 Blüte von Pirus communis. Längsschnitt. Vergrößert 1 und 2 nach Focke; 3 und 4 nach Wettstein.

Hamamelidaceae. Der Blütenbau ist in dieser Familie recht mannigfach; im allgemeinen sind sie vier- bis fünfzählig, mit oberständigem bis unterständigen Fruchtknoten, der zweifächerig ist; die Griffel sind getrennt; die Blüten sind zwitterig oder eingeschlechtlich, heterochlamydeisch oder apopetal, schließlich auch nackt; die Frucht ist eine Kapsel, die zugleich wand- und fachspaltig ist. Die Hamamelidaceae sind Holzgewächse mit spiraligen Blättern mit Nebenblättern; sie sind in den subtropischen Gegenden Afrikas, Asiens und Amerikas verbreitet; die zerstückelten Areale der artenarmen Gattungen lassen auf eine zusammenhängende Verbreitung der alten Familie im Tertiär schließen.

Liquidambar, mit monöcischen Blüten; die männlichen stehen in Aehren, sie sind nackt, so daß die einzelnen Blüten nicht zu unterscheiden sind, die weiblichen Blüten stehen in Köpfchen, mit verwachsenen Kelchen, Pflanze mit Balsamgängen, Liquidambar styraciflua von Zentralamerika nach dem atlantischen Nordamerika (Storax); Fothergilla, Strauch mit apopetalen Blüten mit vielen Staubblättern, Fothergilla alnifolia in Nordamerika; verwandt Corylopsis, in Ostasien.

Platanaceae. Die Blüten sind monöcisch und stehen in kugeligen Köpfchen; sie haben eine doppelte unscheinbare Blütenhülle; Staubblätter drei bis acht, mit keuligen Antheren; Carpelle drei bis acht, getrennt, mit je einer hängenden Samenanlage.

Platanus, Platane, hohe Bäume mit gelappten Blättern, Platanus orientalis im Mittelmeergebiet und bis zum Himalaya, Platanus occidentalis, in Nordamerika, viel kultiviert.

Rosaceae. Die Blüten sind meist strahlig (bei den Chrysobalanoideen zygomorph), meist heterochlamydeisch und fünfgliederig;

die Blütenachse ist in den Gruppen sehr verschieden, konvex, oder flach, oder konkav bis krugförmig, so daß Blütenhülle und Staubblätter hypogyn, perigyn oder epigyn sein können; Staubblätter meist zwei- bis viermal so viel als Petalen oder bis viele, selten nur wenige (Alchimilla); Carpelle seltener nur eins bis wenige, gewöhnlich in größerer Zahl frei oder mit der hohlen Achse der Blüte verwachsen, Samenanlagen meist zwei; Früchte Kapseln oder Beeren oder Steinfrüchte; an ihrer Bildung nimmt oft die Blütenachse Anteil (Halbfrüchte). Die Rosaceen sind Kräuter oder Holzgewächse mit abwechselnden Blättern und allermeist mit Nebenblättern; die Familie ist über die Erde verbreitet.

Unterfamilie Spiraeoideae: Carpelle meist fünf aber auch andere Zahlen; Blütenachse weder konkav noch vorgewölbt; Kapselfrüchtchen; Spiraea, Blätter ohne Nebenblätter, artenreich in der nördlich gemäßigten Zone; Quillaja saponaria, in Chile, Seifenbaum, mit saponinreicher Rinde.

Unterfamilie Pomoideae: Carpelle mit der hohlen Blütenachse und unter sich mehr oder weniger verwachsen; durch Vereinigung mit der fleischig werdenden Blütenachse entsteht die apfelförmige Scheinfrucht; Cydonia vulgaris, Quitte, Südeuropa; Mespilus germanica, Mispel; Sorbus aucuparia, Eberesche, Europa und Nordasien; Eriobotrya japonica, japanische Mispel, viel kultiviert; Pirus communis, Birnbaum, Europa und Nordasien, Pirus malus, Apfelbaum, zahlreiche Kulturformen.

Unterfamilie Rosoideae: Carpelle frei, am Grunde und an den Wänden der krugförmigen Achse, an derem Rande Kelchblätter, Blumenblätter und Staubblätter stehen; die Blütenachse wird fleischig (Hagebutte) und enthält die einsamigen Schließfrüchtchen. Rosa,

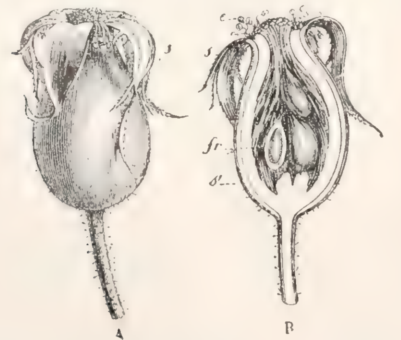


Fig. 48. Frucht von Rosa. s′ Blütenachse, s Kelchblätter, e Reste der Staubblätter, fr Früchtchen.

besonders in der nördlich gemäßigten Zone, viele Arten und Bastarde; die Edelrosen stammen besonders von Rosa gallica (europäisch-orientalische Formen; Rosenöl im Balkan und in Persien gewonnen) und von Rosa indica (ostasiatische Formen, z. B. Teerosen).

Unterfamilie Potentilloideae: Carpelle zahlreich, frei; der Blütenboden konvex vorgewölbt, er bildet mit den Schließfrüchtchen Scheinfrüchte. Potentilla, Fingerkraut, artenreich in der nördlich gemäßigten und kalten Zone; Fragaria, Erdbeere, mit fleischigem Blütenboden, dem die kleinen Schließfrüchtchen eingesenkt sind; Rubus, die Früchtchen mit fleischiger Außenschicht, sie verwachsen untereinander und sitzen dem ziemlich harten kegelförmigen Blütenboden auf, außerordentlich formenreiche, über die Erde verbreitete Gattung mit schwer zu trennenden Arten, Rubus chamaemorus, Moltebeere, zirkumpolar, Rubus idaeus, Himbeere, Rubus caesius usw., Brombeere.

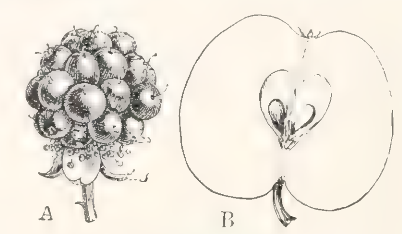


Fig. 49. A Frucht von Rubus fruticosus, B von Pirus Malus.

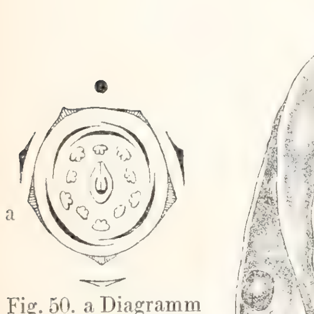
Unterfamilie Poterioideae: Carpelle in geringer Zahl; Blütenachse krugförmig, zuletzt erhärtend und die Schließfrüchtchen umgebend. Alchimilla, Frauenmantel, apopetal, Fruchtblätter 1 bis 4 mit grundständigem Griffel, viele Arten parthenogenetisch.

Unterfamilie Prunoideae: Ein in der schüsselförmigen Blütenachse grundständiges Carpell mit zwei Samenanlagen; die Steinfrucht (mit der Achse) einsamig; Staubblätter meist viele am Rande der Blütenachse. Prunus, Prunus armeniaca, Aprikose, in Turkestan und der Mongolei heimisch, Prunus domestica, Pflaume, Heimat nicht sicher bekannt, Prunus spinosa, Schlehdorn, Prunus amydalus, Mandel, wild in Turkestan und Mittelasien, mit lederigem Exokarp, in zwei Formen, bittere und süße Mandel, Prunus persica, Pfirsich, in China heimisch, Prunus avium, Süßkirsche, in Europa heimisch, Prunus cerasus, Sauerkirsche, aus Kleinasien, Prunus laurocerasus, Kirschlorbeer, mediterran.

Unterfamilie Chrysobalanoideae: Mit zygomorphen Blüten, Carpelle 1 bis 5, frei, mit grundständigem Griffel; tropisch. Chrysobalanus icaco liefert Obst, tropisches Amerika, ebenso Parinarium, in Afrika.

Connaraceae. Die Familie schließt sich eng an die Leguminosen an, ist aber durch das Fehlen der Nebenblätter und durch das Vorkommen von zwei bis fünf (meist fünf) freien Carpellen unterschieden. Die Connaraceae sind Holzgewächse der Tropen, häufig große Lianen mit unpaarig gefiederten Blättern und fünfgliederigen Blüten; die Carpelle haben zwei Samenanlagen am Grunde; von den Carpellen entwickelt sich nur eines zu einer einsamigen Kapselfrucht; Samen mit Arillus; Connarus, Rourea.

Leguminosae. Die Blüten sind fünfgliederig, heterochlamydeisch, meist zygomorph; Staubblätter meist zehn, seltener viele; besonders charakteristisch ist der oberständige Fruchtknoten, der von einem Carpell gebildet wird, das die Samenanlagen, gewöhnlich in größerer Zahl in zwei Reihen, an der



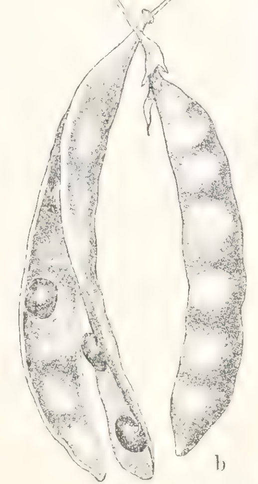


Fig. 50. a Diagramm von Vicia Faba. Nach Eichler. b Frucht von Laburnum vulgare. Nach Wettstein.

Bauchnaht trägt; die Frucht ist einfächerig und springt meist zweiklappig längs der Bauch- und Rückennaht auf (Hülse), seltener nur längs der Bauchnaht (Balgfrucht); selten ist die Frucht durch falsche Querwände gekammert und zerfällt in einzelne Glieder; Samen ohne Nährgewebe. Die Leguminosen sind eine der artenreichsten Familien der Angiospermen und über die Erde verbreitet; die Arten sind Kräuter oder Holzgewächse mit einfach oder mehrfach gefiederten Blättern mit Nebenblättern.

Unterfamilie Mimosoideae: Die Blüten sind strahlig, Blütenblätter in der Knospe klappig; die Einzelblüten meist klein, aber häufig in dichte Köpfchen oder Aehren gestellt, die dann durch die vielen Staubblätter auffallen. Zur Unterfamilie gehören Holzgewächse der wärmeren Länder. Acacia, Blüten mit vielen freien Staubblättern, ungefähr 500 Arten der Tropen und Subtropen, besonders viele in trockenen Gegenden Afrikas und Australiens; bei der artenreichen Gruppe der Phyllodinae in Australien sind die Stiele der Blätter nach Verlust der Fiedern spreitenartig ausgebildet; häufig sind die Bäume stachelig oder dornig (Stipulardornen von Ameisen bewohnt); Gummi-arabicum liefern mehrere afrikanische Arten, Acacia senegal, Acacia seyal, Acacia arabica, das Harz tritt an den Bäumen von selbst aus; Inga, mit mehr oder weniger verwachsenen Staubblättern, im tropischen Amerika; Mimosa, mit zehn Staubblättern, 300 Arten meist tropisch amerikanisch, viele kletternde Halbsträucher oder Sträucher, Mimosa pudica, Sinnpflanze, mit gegen Berührung und Erschütterung sehr empfindlichen Blättern.

Unterfamilie Caesalpinioideae: Blüten zygomorph, mit freien Staubblättern, nicht schmetterlingsförmig, öfters apopetal; das oberste Blumenblatt in der Knospenlage das innerste (aufsteigende Deckung). Holzgewächse der Tropen, in Europa nur zwei Arten, Cercis siliquastrum, Judasbaum, stammblütig und Ceratonia siliqua, Johannisbrot, mediterran; Hymenaea courbaril, Südamerika, liefert Kopal; Tamarindus indica, Tamarinde, wahrscheinlich in Afrika heimisch; Bauhinia, tropisch, teilweise riesige Lianen mit flachen gewundenen Stämmen (Affentreppen); Cassia, 400 Arten tropisch, subtropisch; mehrere Arten in Afrika und Vorderasien liefern Sennesblätter; Haematoxylon campecheanum, Campecheholzbaum (Blutholzbaum), in Zentralamerika heimisch.

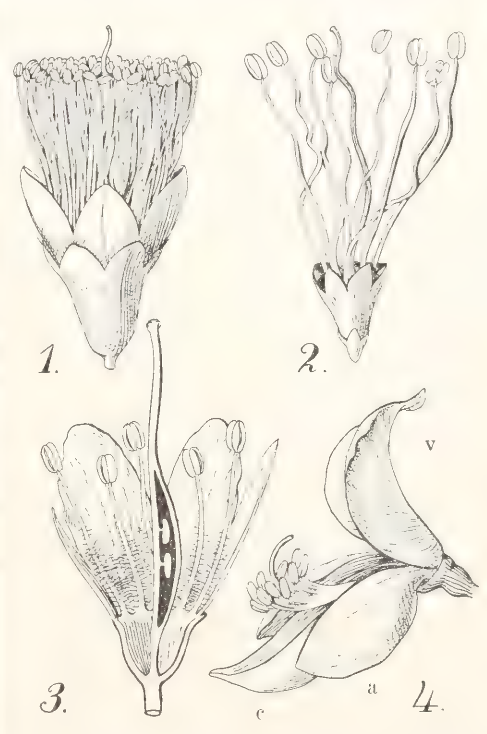


Fig. 51. Blüte der Leguminosae. 1 Blüte von Acacia decurrens, strahlig, mit vielen Staubblättern. 2 Blüte von Mimosa pudica, vierteilig, mit 8 Staubblättern. 3 Blüte von Haematoxylon campecheanum im Längsschnitt. 4 Schmetterlingsblüte von Spartium junceum. c Carina, a Alae, v Vexillum.

Unterfamilie Papilionatae: Blüten zygomorph, Schmetterlingsblüten; Petalen mit absteigender Deckung, das oberste ist meist gerundet (Fahne, vexillum), die beiden seitlichen sind genagelt (Flügel, alae), die beiden unteren bilden mehr oder weniger verwachsen das Schiffchen (carina); Staubblätter zehn, die Staubfäden sind in eine Röhre verwachsen (Androeceum monadelphisch) oder der hinterste Staubfaden ist frei (Androeceum diadelphisch). Meist Kräuter oder

kleine Holzgewächse mit gefingerten oder unpaarig gefiederten Blättern; an der Basis der Fiederblättchen finden sich Gelenke für Variationsbewegungen. Folgende Gruppen können unterschieden werden: Genisteae, Andröceum meist monadelphisch, Blätter gefingert mit ganzrandigen Blättchen. Lupinus, 100 Arten, meist im westlichen Amerika, Laburum vulgare, Goldregen, Ulex europaeus, Stechginster, Dornstrauch des westlichen Mitteleuropa; Spartium junceum, Ginster in Südeuropa; Sarothamnus scoparius, Besenginster, in Mitteleuropa. Trifolieae, Androeceum meist diadelphisch, Blätter meist gefingert mit gezähnten Blättchen. Trifolium, Klee, 300 Arten, teilweise gute Futterpflanzen, Medicago, mit häufig spiral eingerollter Frucht, Medicago sativa, Luzerne, Futterpflanze, Melilotus officinalis, Steinklee. Galegeae, Androeceum meist diadelphisch, Kräuter oder Holzgewächse mit gefiederten Blättern. Indigofera, artenreich in den Tropen, Indigofera tinctoria und Indigofera anil liefern Indigo; Robinia pseudacacia, Robinie, Akazie, in Nordamerika heimisch, auf armem Boden viel angepflanzt, Caragana arborescens, Erbsenstrauch, in Zentralasien heimisch; Astragalus, eine der artenreichsten Gattungen der Blütenpflanzen, häufig dornige, niedrige Sträucher, besonders in den Steppen Vorderasiens, auch viele in den Anden, mehrere Arten liefern Tragantgummi; Glycyrrhiza glabra, mediterran, die Wurzeln liefern Süßholz. Hedysareae, Andröceum meist diadelphisch, Blätter gedreit oder gefiedert, Hülse bei der Reife quer gegliedert. Ornithopus sativus, Seradella, Futterpflanze auf Sandboden, im westlichen Mittelmeergebiet heimisch; Onobrychis sativa, Esparsette, Futterpflanze; Arachis hypogaea, Erdnuß, in den Tropen überall in Kultur, der Name stammt daher, daß die Fruchtstiele sich abwärts krümmen und die Samen in der Erde reifen, die Samen werden gegessen und liefern Speiseöl. Vicieae, Androeceum meist diadelphisch; die Spindel des Fiederblattes geht in eine Borste oder eine Ranke aus. Vicia, Wicke, viele Arten gute Futterkräuter, Vicia faba, Saubohne, eine der ältesten Kulturpflanzen; Lens esculenta, Linse, mediterran; Pisum sativum, Erbse. Phaseoleae, im Blütenbau der vorigen Gruppe ähnlich; windende Kräuter oder Sträucher mit gedreiten oder gefingerten Blättern. Glycine soja, Sojabohne in Japan; Erythrina, Sträucher wärmerer Länder mit großen ornithophilen Blüten (Bestäubung durch Kolibris usw.); Phaseolus vulgaris, Bohne, aus Südamerika stammend; Dolichos lablab, Hülsengemüse der Tropen.

18. Reihe Geraniales. Die Reihe umfaßt zunächst Familien, die in ihren fünfgliederigen Blüten den Dikotylentypus zum reinsten Ausdruck bringen; diese sind strahlig mit abwechselnden Kreisen und oberständigem Fruchtknoten; in Familien, die sich dann weiterhin anschließen, werden die Blüten zygomorph und es treten mannigfache Reduktionen ein, z. B. bis zum völligen Schwinden der Blütenhülle; Carpelle gewöhnlich mit zwei Samenanlagen, diese epitrop mit ventraler Raphe und der Mikropyle nach oben oder bisweilen mit dorsaler Raphe und der Mikropyle nach unten.

Geraniaceae. Blüten durchaus fünfgliederig, meist strahlig, Staubblätter in zwei bis drei Kreisen; die Kapselfrucht zerfällt in fünf begrannte oder geschnäbelte Teilfrüchte.

Geranium, Storchschnabel, krautige Gewächse, die Grannen entspringen bogig vom Mittelsäulchen der Frucht, gegen 200 Arten in gemäßigten Klimaten; Erodium, Reiherschnabel, mit schraubig gedrehten Grannen, diese sind hygroskopisch, durch ihre Krümmungen wird der Same in die Erde getrieben; Pelargonium, Blüten deutlich zygomorph, vielfach verholzende Arten, zahlreich in Südafrika entwickelt.

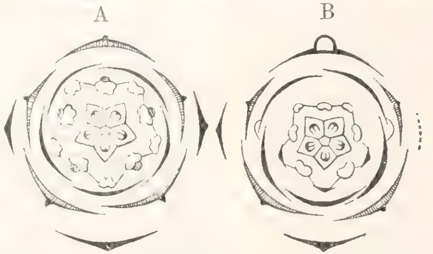


Fig. 52. A Diagramm von Geranium pratense; B Diagramm von Pelargonium zonale. Nach Eichler.

Oxalidaceae. Blüten strahlig, fünfgliederig, Staubblätter in zwei Kreisen, die Filamente hängen unten zusammen; der Fruchtknoten ist fünffächerig, die Fächer mit einer bis vielen Samenanlagen.

Oxalis, über 200 Arten, besonders in Südafrika und im extratropischen Südamerika, Stamm häufig knollig oder zwiebelförmig, Blätter gefingert, mit Schlafbewegungen; Biophytum sensitivum, tropisch, die Blätter reagieren auf Berührungsreiz.

Tropaeolaceae. Blüten zygomorph, da die Blütenachse in einem langen Sporn ausgeht; Staubblätter acht (zwei median stehende ausgefallen), Carpelle drei mit je einer Samenanlage; die Frucht zerfällt in drei einsamige Schließfrüchte.

Tropaeolum, krautige Gewächse, mit den langen Blattstielen rankend und kletternd, in den Gebirgen Zentral- und Südamerikas, Tropaeolum majus, Kapuzinerkresse, häufig kultiviert.

Linaceae. Die Blüten sind strahlig, fünfgliederig, Staubblätter fünf (bis 20), Staubfäden am Grunde verwachsen; Fruchtknoten gewöhnlich fünffächerig, Frucht meist eine Kapsel. Die Linaceae sind meist Kräuter mit schmalen abwechselnden Blättern.

Linum, 90 Arten, subtropisch und in gemäßigten Klimaten, besonders mediterran, Linum usitatissimum, Lein, in zwei Formen, Linum usitatissimum vulgare (Schließlein,

wichtige Faserpflanze, mit nicht aufspringender Frucht) und Linum usitatissimum humile (Klanglein, mit aufspringender Kapsel, der Samen wegen kultiviert, Leinöl); der Lein ist nur Kulturpflanze, nicht wild bekannt, er stammt wahrscheinlich von dem mediterranen Linum angustifolium; der kultivierte Lein schon aus der Pfahlbautenzeit bekannt. Vgl. Wettstein in Wiesner, Rohstoffe II.

Erythroxylaceae. Die Blüten sind fünfgliederig, die zehn Staubblätter sind am Grunde zu einer Röhre vereint; der Fruchtknoten ist drei- bis vierfächerig, aber nur



Fig. 53. Linum usitatissimum. A. Blüte; B. Androeceum und Gynoeceum; C. Frucht. B und C vergrößert.

in einem Fach werden ein bis zwei Samenanlagen entwickelt; die Frucht ist eine Steinfrucht. Strauchige Gewächse, Blätter mit Nebenblättern; die Familie ist besonders im tropischen Amerika entwickelt.

Erythroxylon coca, in Peru und Brasilien, Kokastrauch, die Blätter als Anregungsmittel genossen, aus ihnen wird Kokain gewonnen.

Zygophyllaceae. Die Blüten sind meist fünfgliederig, strahlig, Staubblätter zehn, am Grunde häufig mit blattartigen Anhängseln, die des ersten Kreises vor den Petalen, Fruchtknoten meist vier- bis fünffächerig, mit einem Griffel; Frucht verschieden. Die Zygophyllaceen sind Holzgewächse oder selten Kräuter der wärmeren Länder, mit meist gefiederten Blättern, viele halophil und xerophytisch.

Guayacum officinale, im tropischen Amerika, liefert Guajakholz; Zygophyllum, viele Arten in Steppen und Wüsten der alten Welt; Tribulus terrester, Kraut mit dornigen Teilfrüchten, mediterran, Verbreitung durch Tiere; Peganum harmala, im östlichen Mediterrangebiet und Zentralasien, liefert in den Samenschalen Türkisch Rot.

Hier wird angeschlossen die kleine Familie der Cneoraceae mit dreigliedrigen Blüten; Sträucher im Mediterrangebiet und auf den Canaren.

Rutaceae. Die fünf- (oder vier-) gliederigen Blüten sind strahlig, meist zweigeschlechtlich und besitzen zwischen Staubblättern und Fruchtknoten einen polsterförmigen oder becherförmigen Diskus; Andröceum diplostemon oder haplostemon; Carpelle gewöhnlich vier bis fünf, verwachsen oder teilweise frei, mit meist je zwei Samenanlagen. Die Rutaceae sind meist Holzgewächse; charakteristisch sind lysigene Oeldrüsen (Blätter punktiert!), die ihren häufig starken Geruch bedingen; sie sind besonders in wärmeren Ländern reich entwickelt, zahlreich im Kapland und in Australien.

Ruta graveolens, Raute, mediterran, auch bis Westdeutschland, Dictamnus albus, Diptam, in Mittel- und Südeuropa, Pilocarpus, in Brasilien, liefert Folia Jaborandi, Cusparia trifoliata, in Columbien, liefert Cortex Angosturae; Ptelea trifoliata, im atlantischen Nordamerika heimisch, viel kultiviert; Citrus, wichtigste Gattung, Frucht eine Beere mit saftreicher Pulpa, die von Emergenzen der Innenseite der Fruchtwandung gebildet wird, Citrus aurantium, Pomeranze, aus dem südöstlichen Asien stammend, mit der Unterart chinensis, Apfelsine, Citrus medica, Zitrone, im Himalayagebiet heimisch, Citrus nobilis, Mandarine, in China heimisch.

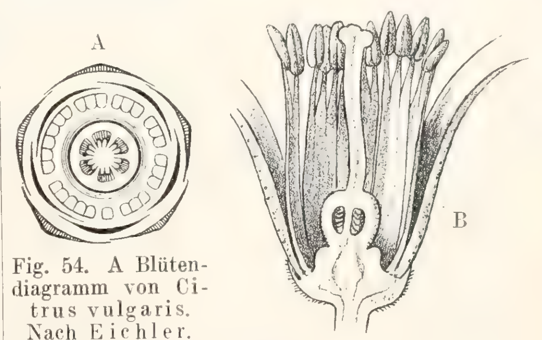


Fig. 54. A Blütendiagramm von Citrus vulgaris. Nach Eichler. B Blüte von Citrus aurantium längs durchschnitten. Nach Wettstein.

Simarubaceae. Die Simarubaceae schließen sich im Blütenbau eng an die Rutaceen an; ihre Blüten sind aber meist eingeschlechtlich; sie haben niemals Oeldrüsen, sind aber durch den reichen Gehalt an Bitterstoffen ausgezeichnet.

Quassia amara, im tropischen Amerika und Picrasma excelsum, in Westindien, liefern Quassiaholz, Bitterholz; Ailanthus glandulosa, Götterbaum, in China heimisch, viel kultiviert.

Burseraceae. Auch die Burseraceae stehen im Blütenbau den Rutaceen sehr nahe; die Frucht ist eine Steinfrucht mit mehreren Steinkernen. Sie sind Holzgewächse warmer Länder mit Balsam- und Harzgängen in der Rinde; infolgedessen

liefern sie wichtige aromatische Harze und Balsame, die als Räuchermittel usw. dienen.

Commiphora, viele Arten in den Steppen von Afrika, Commiphora abyssinica, ein kleiner Baum im südlichen Arabien und nördlichen Abyssinien, liefert im getrockneten Balsam der Rinde die echte Myrrhe; Boswellia Carteri, in Arabien und Somali, liefert Olibanum oder Weihrauch; Canarium-Arten im tropischen Asien liefern Harze (Fackelharz usw.) und Kopale.

Meliaceae. Die Blüten stehen in Rispen, sie sind meist fünfgliederig, mit zehn Staubblättern, deren Filamente allermeist in eine Röhre verwachsen sind; der Staminaltubus häufig gezähnt oder gelappt; die Blüten sind manchmal sympetal; Fruchtknoten mit einem Griffel, Frucht verschieden. Samen geflügelt oder ungeflügelt.

Die Meliaceae sind Holzgewächse warmer Länder mit gefiederten Blättern. Cedrela odorata, in Westindien und Guyana, liefert Zigarrenkistenholz; Swietenia mahagoni, Mahagonibaum, in Westindien und Peru; Carapa-Arten in Afrika und Amerika liefern in den Samen Carapaöl.

Die folgenden Familien der Geraniales haben meist mehr oder weniger zygomorphe Blüten.

Malpighiaceae. Die Blüten sind fünfgliederig, wenigstens im Gynaeceum schräg zygomorph; Kelch meist mit Nektardrüsen;

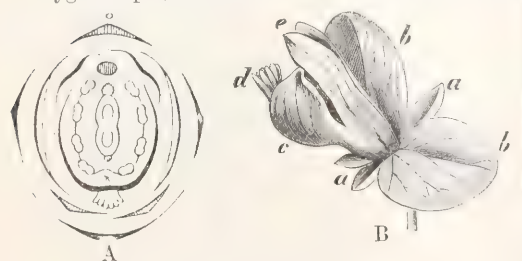


Fig. 55 A Diagramm von Polygala myrtifolia. Nach Eichler.
B Blüte von Polygala senega. a kleine Kelchblätter, b große Kelchblätter, c Kahn, e seitliche Kronblätter, d Anhängsel des medianen Kronblattes. Nach Berg und Schmidt.

Petalen meist genagelt; Staubblätter zehn, Androeceum obdiplostemon; Carpelle gewöhnlich drei mit einer Samenanlage; die Frucht zerfällt in einzelne geflügelte oder ungeflügelte Teilfrüchte. Die Malpighiceae sind Holzgewächse der Tropen, vorzugsweise in Amerika, meist Lianen.

Ausgeprägt zygomorph ist der Blütenbau bei den Polygalaceae. Die Blüten sind median zygomorph; von den fünf Kelchblättern sind zwei flügelförmig, petaloid; Blütenblätter meist nur drei, das vordere groß, schiffchenförmig; Staubblätter acht meist zu einer auf einer Seite offenen Röhre vereint; Carpelle zwei mit mehreren Samenanlagen. Kräuter oder auch kleine Holzgewächse mit abwechselnden Blättern und traubigen Blütenständen.

Polygala, zahlreiche Arten, besonders in Amerika, Securidaca, tropische Schlinggewächse, Epirrhizanthes, Saprophyten in Malesien.

Noch stärker modifiziert sind die Blüten in der kleinen tropisch amerikanischen Familie der Vochysiaceae; diese sind Holzgewächse mit schräg zygomorphen Blüten; ein Kelchblatt gespornt; Petalen meist nur drei bis eines vorhanden; nur ein fruchtbares Staubblatt; drei Carpelle mit vielen bis zwei Samenanlagen.

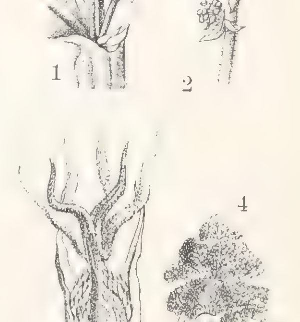


Fig. 56. 1 ♀, 2 ♂ Blüte von Mercurialis perennis. 3 ♀, 4 ♂ Blüte von Ricinus communis. Nach Wettstein.

Dichapetalaceae. Die Blüten sind fünfgliederig, meist strahlig, mit nur einem Kreis von Staubblättern; die Blütenachse bildet einen Discus. Die Petalen sind oft gespalten und mehr oder weniger verwachsen, die Staubblätter häufig mit den Petalen vereint; Carpelle zwei bis drei mit je zwei Samenanlagen. Die Dichapetalaceen sind tropische Holzgewächse, meist klimmend. Ihre Verwandtschaft liegt wohl bei den Euphorbiaceen, bei denen ähnliche Vereinigungen der Staubblätter usw. vorkommen.

Euphorbiaceae. Die Blüten sind oft sehr stark reduziert, stets eingeschlechtlich, in allen Teilen in der Familie stark variierend; gewöhnlich ist ein einfaches Perigon vorhanden, doch nicht selten auch eine doppelte Hülle oder die Blüten sind nackt; Staubblätter von eins bis viele; Fruchtknoten dreifächerig, mit je einer Samenanlage im Fach, die Frucht zerfällt in drei Teilfrüchte (Kokken); die Samen sind über der Mikropyle meist mit einem Anhängsel (carnucula) versehen und enthalten reichliches Nährgewebe. Die Euphorbiaceen sind Kräuter oder Holzgewächse, häufig mit Milchsaft in gegliederten oder ungegliederten Röhren; die artenreiche Familie ist über alle warmen und gemäßigten Länder verbreitet.

Phyllanthus, 400 Arten in wärmeren

Ländern, ohne Milchsaft; Croton, 600 Arten, der Tropen, Kräuter oder Sträucher, Croton eluteria und Croton cascarilla, in Westindien, liefern Kaskarillrinde, Croton tiglium, tropisches Asien, liefert in den Samen Krotonöl; Ricinus communis, in allen wärmeren Ländern verbreitet, die Staubblätter sind wiederholt verzweigt, mit vielen Theken, die Samen liefern Rizinusöl; Hevea brasiliensis, der wichtigste Kautschukbaum, Seringua, im Ueberschwemmungsland des Amazonasgebietes weit verbreitet; Manihot utilissima, Maniokpflanze des tropischen Amerika, liefert in den knolligen Wurzeln das wichtige Nahrungsmittel des Maniokmehles (Fariaha); andere Arten sind als Kautschukpflanzen von steigender Bedeutung, wie Manihot Glaziovii, neuerdings auch in Afrika viel angepflanzt; Codiaeum variegatum, in Malesien heimisch, „Kroton" der Gärtner, in Formen mit panaschierten Blättern viel kultiviert; Excoecaria agallocha, im südlichen Asien, Baum mit stark giftigem Milchsaft; Sapium, mehrere Arten des tropischen Amerika liefern Kautschuk; Hippomane mancinella, Manzinellenbaum, in Zentralamerika und Westindien, mit stark giftigem Milchsaft. Die stärkste Reduktion in den Blüten weist die Gattung Euphorbia selbst auf; die Blütenstände sind bei den meisten Arten mehr oder weniger reiche Cymen, die Partialblütenstände letzter Ordnung sind die sogenannten Cyathien, d. h. die Vereinigung mehrerer männlicher und einer weiblichen Blüte, die von einer glockenförmigen, aus mehreren verwachsenen Blättern entstandenen Hülle umgeben sind; zwischen den Abschnitten stehen große, bei den Arten verschieden geformte Drüsen; die nackte weibliche Blüte mit dreiteiligen Fruchtknoten steht zentral im Cyathium und ragt mit ihrem Stiel aus der Hülle hervor; um sie herum stehen die nackten, nur aus einem



Fig. 57. Diagramm eines Dichasialzweiges von Euphorbia. Fertile weibliche Blüte nur im Mittelcyathium. Nach Eichler.

Staubblatt gebildeten männlichen Blüten. So gewinnen die Cyathien die Form von Einzelblüten; bei Euphorbia reicher Milchsaft; in trockenen Gegenden, besonders in Afrika und Arabien sind kaktusähnliche fleischige Arten entwickelt, deren Blätter ganz oder fast ganz rückgebildet sind.

Callitrichaceae. Die Blüten sind nackt, eingeschlechtlich, die männlichen mit einem Staubblatt, die weiblichen mit zwei Carpellen, die bei der Reife in vier einsamige Steinfrüchtchen zerfallen.

Nur die Gattung Callitriche mit wenigen Arten über die Erde verbreitet, Wasser- oder Sumpfpflanzen. Wie bei anderen Gruppen mit starker Reduktion ist die Verwandtschaft schwer anzugeben, von anderen Autoren werden die Callitrichaceen auch in die Nähe der Halorrhagidaceen gebracht.

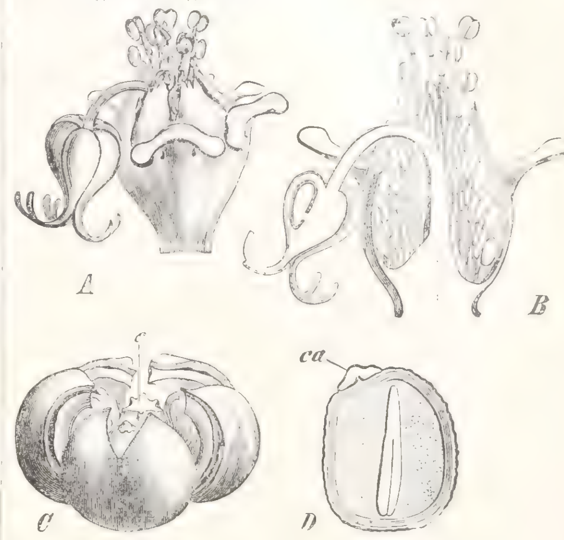


Fig. 58. Euphorbia Lathyris. A Cyathium, Vergrößert 4. B Cyathium längsdurchschnitten, Vergrößert 7. C Frucht aufgesprungen zeigt das Mittelsäulchen (c). D Samenlängsschnitt. Keimling im Endosperm, ca Caruncula. A bis D nach Baillon.

19. Reihe Sapindales. Im Blütenbau im wesentlichen mit der vorigen Reihe übereinstimmend, die Samenanlagen sind aber entgegengesetzt orientiert, entweder hängend mit dorsaler Raphe und der Mikropyle nach oben oder aufsteigend mit ventraler Raphe und der Mikropyle nach unten.

Buxaceae. Blüten eingeschlechtlich, mit einfacher Blütenhülle; Carpelle meist drei mit je zwei Samenanlagen, Frucht meist eine fachspaltige Kapsel. Zur kleinen Familie gehören Holzgewächse mit immergrünen Blättern.

Buxus sempervirens, Buchsbaum, mediterran und westeuropäisch, Sträuchlein mit achselständigen dichten Infloreszenzen.

Empetraceae. Blüten heterochlamydeisch, zwei- bis dreigliederig, Carpelle zwei bis neun mit einzelnen Samenanlagen, Steinfrucht. Wenige Arten von ericoidem Habitus mit schmalen Blättern.

Empetrum nigrum, Krähenbeere, Rauschbeere, circumpolar und auf Hochmooren der Gebirge der nördlichen Halbkugel, mit dreigliederigen Blüten. Hier wird auch die ohne nähere Verwandtschaft dastehende kleine Familie der Coriariaceae angeschlossen; Blüten fünfgliederig, die Petalen nach den Verblühen vergrößert, Carpelle fünf oder zehn, einsamige Kokken ausbildend, wenige Arten, Sträucher, von sehr zerstreuter Verbreitung.

Anacardiaceae. Blüten zwitterig oder eingeschlechtlich, meist fünfgliederig, regelmäßig; Blütenachse verschieden ausgebildet, daher der Fruchtknoten oberständig bis unterständig; Carpelle (seltener fünf) meist drei bis eines, mit je einer Samenanlage; die einsamige Frucht ist meist steinfruchtartig. Die Anacardiaceae sind Holzgewächse der wärmeren Länder mit abwechselnden Blättern; stets schizogene Gummiharzgänge.

Mangifera indica, Mangobaum, im tropischen Asien heimisch, einer der besten Obstbäume der Tropen, viel kultiviert; Anacardium occidentale, Baum im tropischen Amerika, die nierenförmigen Schließfrüchte („Elefantenlaus") sitzen auf dickem fleischigem, eßbarem Stiel; Spondias, mehrere Arten Obstbäume der Tropen; Pistacia, mediterran, Pistacia vera, Pistazie, mit eßbaren Samen, Pistacia lentiscus, liefert Mastix; Rhus, Bäume und Sträucher wärmerer Länder mit gefiederten Blättern, Rhus typhina, Nordamerika, viel angepflanzt, Rhus toxicodendron, Ostasien, Nordamerika, Gift-Sumach, stark giftig, eine Berührung des Strauches erzeugt auf der Haut starke Ausschläge.

Aquifoliaceae. Die Blüten sind diöcisch, vier- bis fünfgliederig; die Staubblätter sind häufig am Grunde mit den Petalen verwachsen, der kugelige oder eiförmige, zwei bis vier, selten mehrfächerige Fruchtknoten bildet eine Steinfrucht mit einsamigen Kernen aus. Die Aquifoliaceae sind Holzgewächse mit einfachen, lederigen Blättern.

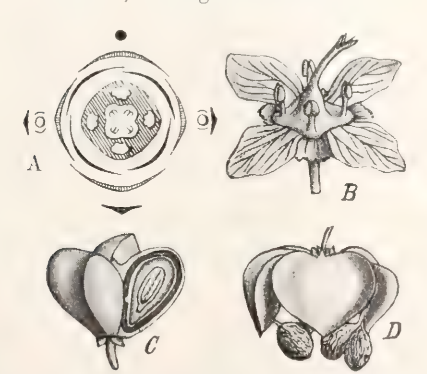


Fig. 59. A Blütendiagramm von Evonymus europaea. Nach Eichler. B Blüte vergrößert; C Frucht; D Frucht geöffnet.

Ilex aquifolium, Stechpalme, in Westdeutschland, West- und Südeuropa; Ilex paraliuariensis, der Matebaum, im La Plata-Gebiet, gefert den Mate-Tee (yerba mate, yerba), der in Südamerika allgemein genossen wird.

Celastraceae. Die kleinen Blüten sind zwitterig, fünfgliederig und entwickeln einen fleischigen Discus, an dessen Rande die den Petalen gleichzähligen Staubblätter stehen; Frucht eine Kapsel oder beerenartig, Samen meist mit gefärbtem Arillus. Die Celastraceae sind Holzgewächse mit einfachen Blättern; die Familie ist weit verbreitet.

Evonymus europaea, Pfaffenkäppchen, Europa, Samen mit rotem Arillus; Catha edulis, in Arabien und Ostafrika, liefert Khat-Tee. Hier schließen sich einige Familien von geringerer Bedeutung an: Hippocrateaceae, von den Celastraceen besonders durch das Vorkommen von drei Staubblättern unterschieden; Blüten mit Discus; die Hippocrateaceae sind tropische Holzgewächse, meist Lianen. Staphyleaceae, durch gefiederte Blätter ausgezeichnet; Blüten fünfzählig bis auf Dreizahl der Carpelle, mit Diskus; Staphylea pinnata, in Südosteuropa und Vorderasien, und einige andere Arten. Icacinaceae, ausgezeichnet durch den aus drei Carpellen gebildeten, einfächerigen Fruchtknoten und durch die einsamige Steinfrucht; die Icacinaceae sind Holzgewächse der Tropen, oft klimmend; Villaresia congonka in Südbrasilien liefert eine Art Mate.

Aceraceae. Kelch und Blumenkrone durchschnittlich vier- bis fünfzählig, aber die Zahlen auch wechselnd; Blüten selten diöcisch, meist männliche und zwitterige auf demselben Baum, häufig mit Rudimenten des anderen Geschlechtes; der Diskus ist intrastaminal bis extrastaminal; Fruchtknoten zweifächerig, jedes Fach mit zwei Samenanlagen, die Frucht besteht aus zwei geflügelten, einsamigen Teilfrüchten. Die Aceraceae sind Holzgewächse mit gegenständigen Blättern und traubigen oder rispigen Blütenständen.

Acer, Ahorn, 120 Arten, viele in Ostasien; Acer pseudoplatanus, Bergahorn, und Acer campestre, Feldahorn, in Europa, Acer saccharinum, Zuckerahorn, in Nordamerika, Acer negundo, in Nordamerika heimisch, mit unpaarig gefiederten Blättern.

Hippocastanaceae. Die Blüten sind zwitterig oder durch Abort eingeschlechtlich, schräg zygomorph, da von den Staubblättern beider Kreise nur fünf bis acht entwickelt sind; die dreiklappig aufspringende Kapsel enthält nur einen Samen.

Aesculus hippocastanum, Roßkastanie, im Balkan und in Kleinasien heimisch; Aesculus pavia, rotblühend, im atlantischen Nordamerika heimisch.

Sapindaceae. Die Blüten sind meist schrägzygomorph, mit einem Diskus zwischen den Petalen und Staubblättern; Staubblätter gewöhnlich acht; Fruchtknoten meist dreifächerig, jedesFach mit einerSamenanlage; Frucht sehr verschieden. Die Sapindaceae sind eine artenreiche Familie der Tropen, in mehreren Gattungen Lianen mit anomalem Holzbau.

Paullinia und Serjania, artenreich im tropischen Amerika, Lianen, Paullinia cupana liefert die Guarana, die aus den koffeinhaltigen Samen bereitet wird; Sapindus saponaria, Seifenbaum in Südamerika; Litchi chinensis, in Ostasien, Obstfrucht (chinesische Pflaume, Zwillingspflaume).

Balsaminaceae. Die zygomorphen Blüten haben nur drei Kelchblätter, von denen eines in einen Sporn ausgeht; Blütenblätter fünf, dabei je zwei seitliche zusammenhängend; die Antheren der fünf Staubblätter hängen zusammen und überdecken den Griffel kapuzenförmig; die Frucht ist eine elastisch mit Klappen aufspringende Kapsel mit vielen Samenanlagen. Die Balsaminaceae sind meist tropische, saftreiche Kräuter mit ansehnlichen Blüten.

Impatiens, 300 Arten, besonders im tropischen Afrika. Impatiens nolitangere, Springkraut, in Europa, Impatiens balsamina, Balsamine, in Indien heimisch.

An das Ende dieser Reihe wird auch, in der Verwandtschaft einigermaßen zweifelhaft, die kleine tropische Familie der Sabiaceae gestellt; zu ihr gehören Holzgewächse oder Kletterpflanzen, deren Blüten besonders dadurch ausgezeichnet sind, daß die Staubblätter (in einem Kreise) vor den Petalen stehen; die Frucht ist meist einfächerig mit einer Samenanlage; Meliosma, tropisch, Sabia, in Ostasien.

20. Reihe Rhamnales. Die Blüten sind in dieser Reihe zyklisch, mit doppelter Blütenhülle, bisweilen apopetal; der Fruchtknoten ist zwei- bis fünffächerig; besonders charakteristisch ist das Vorkommen von nur einem Staubblattkreis, dessen Glieder vor den Petalen stehen.

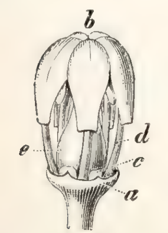


Fig. 60. Vitis vinifera. Oeffnung der Blüte. a Kelch, b Krone, c Discus, d Staubblätter, e Fruchtknoten. Vergrößert. Nach Berg und Schmidt.



Fig. 61. Blütendiagramm von Parthenocissus quinquefolia. Nach Eichler.

Rhamnaceae. Die kleinen Blüten sind fünf- oder viergliederig; häufig ist Neigung zu perigyner und epigyner Insertion vorhanden; die Frucht ist trocken oder eine Steinfrucht mit einsamigen Kernen. Die Rhamnaceae sind meist Holzgewächse, häufig dornig, mit cymösen Blütenständen.

Zizyphus vulgaris, mediterran, liefert Jujubenfrüchte; Rhamus cathartica, Kreuzdorn, Rhamus frangula, Faulbaum; Colletia, in Südamerika, blattlose xerophile Sträucher mit starken Dornen.

Vitaceae. Im Blütenbau der vorigen Familie ähnlich; die kleinen Blüten stehen meist in Rispen; der Fruchtknoten ist zweifächerig, mit je zwei Samenanlagen; die Frucht ist eine Beere. Meist mittels Ranken klimmende Holzgewächse; die Ranken stehen im sympodial aufgebauten Sproß den Blättern gegenüber und sind Blütenständen morphologisch gleichwertig.

Vitis vinifera, Weinstock, im südlichen Europa, auch in den Donauländern heimisch, Vitis labrusca, in Nordamerika, wird, ebenso wie andere amerikanische Arten, in Europa mit Vitis vinifera bastardiert, da sie der Reblaus besser widerstehen; Parthenocissus quinquefolia, wilder Wein, in Nordamerika heimisch;

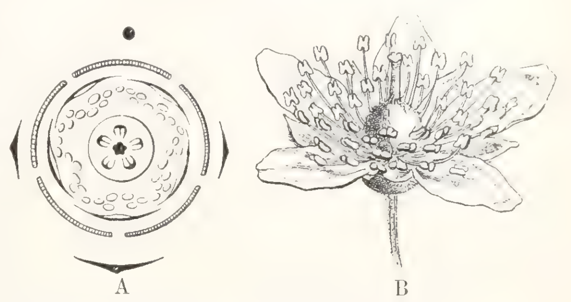


Fig. 62. Diagramm von Tilia. Nach Eichler. B Blüte von Tilia sp. Nach Wettstein.

Cissus, 250 Arten tropisch und subtropisch, besonders interessant sind die großen sukkulenten Arten im südwestlichen Afrika.

21. Reihe Malvales. Die Blüten sind zwitterig, meist strahlig, in Kelch und Petalen fünfgliederig, mit oberständigem Fruchtknoten; der wesentlichste Charakter der Reihe liegt in Androeceum, das typisch aus ein und zwei Kreisen besteht; die Glieder des inneren sind aber vielfach gespalten, die Staubfäden bilden Bündel oder sind verwachsen, während die Antheren frei bleiben.

Tiliaceae. Die Kelchblätter sind klappig, die zahlreichen Staubblätter sind frei oder in mehrere Bündel geordnet, mit dithecischen Antheren; der Fruchtknoten ist mehrfächerig, mit einem Griffel; die Frucht wird öfters durch Abort einfächerig. Die Tiliaceae sind Bäume oder Kräuter der Tropen und der gemäßigten Zonen.

Tilia, Linde, das Trageblatt des kleinen zymösen Blütenstandes ist als „Flügelblatt" dessen Stiel angewachsen und fällt mit dem ganzen Fruchststand ab, 10 Arten in der nördlich gemäßigten Zone; Corchorus olitorius, Jutepflanze, einjährig, in den Tropen kultiviert, wichtige Faserpflanze, ebenso Corchorus capsularis, in Indien heimisch; Sparmannia, Zimmerlinde, im tropischen Afrika.

Die Tiliaceen sind ebenso wie die Malvaceae anatomisch durch das Vorkommen von Schleimschläuchen charakterisiert. Diese fehlen den sonst mit den Tiliaceen verwandten Elaeocarpaceae; zu diesen gehören Holzgewächse, die meist in den Tropen heimisch sind. Auf Madagaskar beschränkt ist die kleine Familie der Chlaenaceae; zu ihnen gehören Holzgewächse mit strahligen Blüten, bei denen die Staubblätter

von einem Becher eingeschlossen sind, der entweder eine Diskusbildung darstellt oder staminodialer Natur ist.

Malvaceae. Die meist schön gefärbten, großen Blütenblätter sind am Grunde unter sich und mit der Staubblattröhre vereinigt, die aus der Verwachsung aller Staubfäden resultiert, die Staubfäden sind nach oben zu frei, die Antheren sind monothecisch, die Pollenkörner groß, bestachelt; Carpelle fünf bis viele, mit einer bis mehreren Samenanlagen, Griffel meist in gleicher Anzahl wie die Carpelle; die Frucht ist eine Kapsel oder zerfällt in einzelne Teilfrüchte; häufig wird ein grüner äußerer Hüllkelch ausgebildet. Die Malvaceae sind Kräuter oder Holzgewächse; die artenreiche Familie ist in warmen und gemäßigten Ländern verbreitet.

Früchte in einzelne Teilfrüchte zerfallend: Abutilon, schönblühende Arten der Tropen, manche in Kultur; Althaea rosea, Eibisch, im östlichen Mediterrangebiet heimisch, Althaea officinalis, in Europa (Radix und Folia Althaeae); Malva, die Carpelle stehen in einem Kreise und lösen sich bei der Reife als einsamige Kokken voneinander, Malva silvestris, in Europa (Flores Malvae vulgaris); Sida, zahlreiche krautige oder halbstaudige

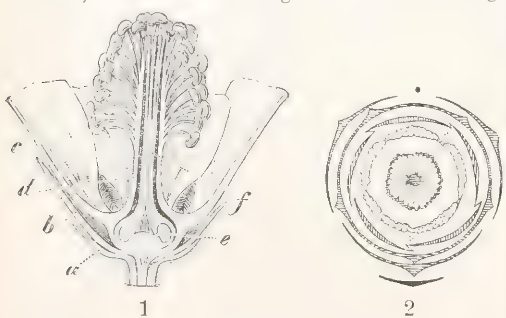


Fig. 63. 1 Althaea officinalis. Blüte im Längsschnitt. a Außenkelch, b Kelch, c Blumenkrone, f der Griffel mit den geschlossenen Narben in der Röhre des Androeceums d. Nach Berg und Schmidt. 2 Diagramm von Malva.

Arten als Unkräuter in den Tropen. Frucht eine fachspaltige Kapsel: Hibiscus, zahlreiche schönblühende Arten der warmen Länder; Gossypium, Baumwolle, hohe Kräuter oder Sträucher, die Samen der großen Kapsel von dichter Wolle bekleidet; die zahlreichen Kulturformen lassen sich auf wenige Arten zurückführen, Gossypium herbaceum, seit alten Zeiten in Ostindien und Vorderasien in Kultur, Gossypium barbadense, besonders in Amerika gebaut, Gossypium arboreum, in Afrika wild, in der alten Welt gebaut.

Bombacaceae. Im Blütenbau mit den Malvaceen nahe übereinstimmend; die Antheren sind ein- bis mehrfächerig, der Pollen ist niemals stachelig. Die Bombacaceae sind Bäume der Tropen mit meist sehr großen, einzeln oder in Rispen stehenden Blüten.

Adansonia digitata, Affenbrotbaum, Baobab, ein riesiger Baum der afrikanischen Savannen; Ceiba pentandra, Wollbaum, in den Tropen verbreitet, liefert Kapokwolle; diese wird nicht an den Samen gebildet, sondern stammt vom Perikarp der Frucht; Durio zibethinus, indisch-malayisch, mit eßbarer Frucht.

Sterculiaceae. Die Blüten sind meist zwitterig, doch auch öfters eingeschlechtlich; die Petalen sind häufig nur schwach entwickelt, der äußere Kreis des Androeceums



Fig. 64. Theobroma cacao. Blüte durchschnitten, die lanzettlichen Staminodien u. d. am Grunde bauchig erweiterten Petalen zeigend. Vergrößert. Nach Wettstein.

ist staminodial oder fehlt ganz, die Staubblätter des inneren Kreises sind häufig gespalten, die Filamente sind mehr oder weniger vereint; der Fruchtknoten ist sitzend oder mit den Staubblättern durch ein Androgynophor emporgehoben; Carpelle meist fünf. Die Sterculiaceae sind Kräuter oder Holzgewächse der Tropen.

Theobroma cacao, Kakaobaum, ein kleiner Baum, ursprünglich in Zentralamerika und im nördlichen Südamerika heimisch, stammblütig, die große gurkenähnliche Frucht enthält zahlreiche Samen (Kakaobohnen); Cola vera, in Westafrika heimisch, die Samen sind die sogenannten Kolanüsse, bekanntes Anregungsmittel; Hermannia, Waltheria, artenreich in den Tropen.

22. Reihe Parietales. Wie in mancher anderen Reihe (z. B. Helobiae) stehen auch hier die Familien auch sehr verschiedener Entwickelungsstufe; den Anfang der Reihe bilden Familien mit zum Teil spiraligen Blüten und freien Carpellen, so daß Beziehungen zu den Ranales hinüberleiten und diese Familie auf tieferer Stufe stehen als die vorhergehenden Reihen; weiterhin sind die Blüten zyklisch, meist heterochlamydeisch und hypogynisch, häufig mit vielen Staubblättern und Carpellen; der Fruchtknoten ist häufig ungefächert mit wandständigen Plazenten, doch kann er auch gefächert sein und zentrale Plazenten besitzen. Ueber die Beziehungen der Cucurbitaceen zu einigen Parietalenfamilien siehe dort.

Zunächst seien einige Familien mit pri-

mitivem Blütenbau (Blüten teilweise spiralig, Carpelle getrennt usw.) erwähnt.

Dilleniaceae. Die Blüten sind meist zwitterig mit drei bis vielen Kelchblättern und meist vielen Staubblättern, Carpelle in wechselnder Zahl mit einer bis vielen Samenanlagen; die Griffel sind getrennt. Die Dilleniaceae sind Holzgewächse warmer Länder, besonders in Australien entwickelt.

Curatella americana, verbreiteter Steppenbaum Südamerikas; Tetracera, zahlreiche Arten tropisch.



Fig. 65. Blüte von Curatella americana im Längsschnitt. Nach Baillon.



Fig. 66. Diagramm von Tetracera volubilis. Nach Eichler.

Ochnaceae. Die Blüten sind zwitterig, fünfgliederig, mit 10 bis vielen Staubblättern; Carpelle mehrere, häufig unterwärts frei, aber durch den gemeinsamen Griffel verbunden. Die Ochnaceae sind tropische Holzpflanzen, die durch die glänzenden einfachen Blätter mit den parallelen Seitennerven auffallen; die gelben Blüten stehen in Rispen.

Ouratea, tropisch, Ochna, in der alten Welt.

Marcgraviaceae. Zu den Marcgraviaceae gehören kletternde oder epiphytische Holzpflanzen des tropischen Amerika; die Blätter sind an den kletternden angedrückten Sprossen anders als an den freien blühenden Sprossen ausgebildet; die Blüten stehen in Trauben, die außen von Tragblättern umgeben sind, die in hohle Nektarien metamorphosiert sind; die Blüten sind strahlig, vier- bis fünfgliederig; Staubblätter in wechselnder Zahl; Samenanlagen viele an erst wandständigen, dann im Zentrum zusammenstoßenden Plazenten.

Theaceae. Auch bei den Theaceae sind die Blüten häufig noch teilweise spiralig; Blüten zwitterig, Kelch und Petalen meist fünf, doch auch andere Zahlen; die Carpelle sind verwachsen, drei bis fünf, mit zentral winkelständigen Plazenten; die Frucht ist eine Kapsel. Die Theaceen sind Holzgewächse der Tropen und Subtropen mit lederigen einfachen Blättern und häufig ansehnlichen Blüten.

Thea, in Indien und Ostasien, Thea sinensis, Teestrauch, besonders in Ostasien und in Indien, auf Ceylon in Kultur, Thea japonica (Camellia japonica) Kamellie, in China und Japan heimisch.

Guttiferae. Die Blüten sind häufig noch teilweise spiralig; die Anzahl und Stellung der Blütenorgane ist recht wechselnd; die Staubblätter, meist in großer Zahl vorhanden, sind häufig in Gruppen oder Bündel vereinigt; der Fruchtknoten ist drei bis fünffächerig oder aber einfächerig mit parietalen Plazenten. Die Guttiferae sind Kräuter oder Holzgewächse mit gegenständigen Blättern; sie sind durch schizogene Sekretlücken (Oelgänge oder -drüsen) ausgezeichnet; außer Hypericum sind die Gattungen fast nur tropisch.



Fig. 67. Thea sinensis. Blühender Zweig. $^2/_3$ natürliche Größe; Frucht und Same. Nach Karsten.

Hypericum, zirka 200 Arten in warmen und gemäßigten Ländern; Mammea ameri-

cana, Baum im tropischen Amerika mit eßbaren Früchten (Mammeiapfel); Calophyllum inophyllum, Baum der Tropen der alten Welt (Takamahakharz); Garcinia, Obstbäume der Tropen der alten Welt, Garcinia morella und andere Arten geben Gummigutt; Pentadesma butyraceum, in Westafrika, Butterbaum.

Dipterocarpaceae. Die Blüten sind zwitterig und strahlig; Staubblätter fünf oder ein mehrfaches von fünf; Carpelle wenige, verwachsen; die Frucht ist meist einsamig und springt nicht auf; charakteristisch ist besonders, daß zwei Kelchblätter an der Frucht zu Flügeln auswachsen. Die Dipterocarpaceae, mit zahlreichen Arten im tropischen Asien verbreitet, sind Holzgewächse, meist stattliche Bäume mit Harzgängen, so daß einige Arten wichtige Harze liefern.

Dryobalanops camphora; Dipterocarpus; Shorea.

Elatinaceae. Die Blüten sind strahlig, haplostemon oder diplostemon, zwei- bis fünfgliederig; Samenanlagen viele an zentralwinkelständigen Plazenten.

Elatine, kleine Wasserpflanzen mit quirligen oder dekussierten Blättern und achselständigen Blüten, Elatine alsinastrum in Mittel- und Südeuropa.

Tamaricaceae. Die Blüten sind strahlig, vier- bis fünfgliederig; Staubblätter so viel als Petalen oder doppelt so viel oder zahlreich; der Fruchtknoten ist einfächerig, die zahlreichen Samenanlagen sitzen an grundständigen oder frei aufsteigenden Plazenten. Die Tamaricaceae sind Kräuter oder Holzgewächse mit schmalen Blättern; sie sind im Mittelmeergebiet und Zentralasien in Wüsten und Steppen verbreitet.



Fig. 68. Diagramm von Helianthemum vulgare. Nach Eichler.

Tamarix gallica, westmediterran, Myricaria germanica, in Süd- und Westeuropa, in den Alpen; in Deutschland verwildert.

Cistaceae. Die häufig schön gefärbten Blüten sind strahlig, zwitterig; Kelch- und Blumenblätter fünf oder drei, Staubblätter zahlreich; drei bis zehn Carpelle bilden einen einfächerigen Fruchtknoten mit parietalen oder weit einspringenden Plazenten; Kapselfrucht. Die Cistaceae sind Kräuter oder kleine Sträucher mit traubigen oder rispigen Blütenständen, die besonders im Mediterrangebiet verbreitet sind.

Bixaceae. Die kleine Familie ist nur in den Tropen heimisch; die Arten sind Holzgewächse mit regelmäßigen ansehnlichen Blüten; zwei Carpelle bilden einen Fruchtknoten mit vielen Samenanlagen an wandständigen Plazenten; die Frucht ist eine dünnwandige Kapsel.

Bixa orellana, Orleansstrauch, im tropischen Amerika weit verbreitet, liefert einen roten Farbstoff in der Samenschale (Uruku der Indianer).

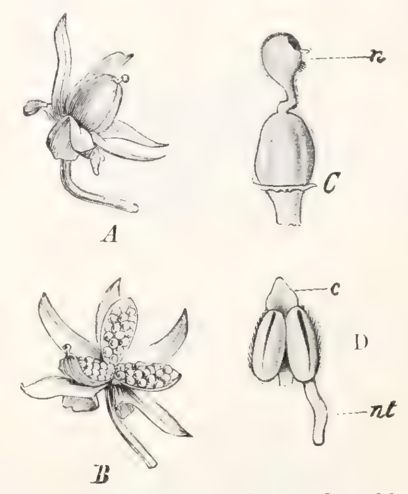


Fig. 69. Viola tricolor. A Kapsel geschlossen, B aufgesprungen. C Fruchtknoten mit Narbe n. D Anthere.

Violaceae. Die Blüten sind fünfgliederig, meist zygomorph; Staubblätter in einem Kreise, mit kurzen Staubfäden über dem Fruchtknoten zusammenneigend; drei Carpelle bilden einen einfächerigen Fruchtknoten mit wandständigen Plazenten, Samenanlagen meist viele; Frucht meist eine Kapsel. Die Violaceen sind krautige oder holzige Gewächse, die letzteren in wärmeren Ländern.

Viola, Veilchen, über 200 Arten, meist in der nördlich gemäßigten Zone, viele auch andin, das vordere Blütenblatt am Grunde gespornt, Viola odorata, Viola tricolor (Stiefmütterchen), Viola altaica, in Südrußland und Sibirien, die Stammpflanze der Gartenstiefmütterchen; Jonidium, tropisch, mit zygomorphen Blüten; Rinorea, tropische Holzgewächse mit strahligen Blüten.

Flacourtiaceae. Die artenreiche Familie ist auf die Tropen beschränkt; die Arten sind meist Holzgewächse mit einfachen Blättern und meist unansehnlichen Blüten, die recht mannigfache Verhältnisse aufweisen; ein monophyletischer Zusammenhang der Familie ist zweifelhaft; die Blüten sind zwitterig oder eingeschlechtlich, öfters apopetal; Staubblätter meist in größerer Zahl; Carpelle in der Zahl wechselnd; Fruchtknoten einfächerig

mit meist vielen Samenanlagen an wandständigen Plazenten; Beere oder Kapsel.

Oncoba; Pangium edule, Malesien; Casearia, 150 Arten, Blätter durchsichtig punktiert. Nahe verwandt die Familie der Turneraceae, deren Arten größtenteils im tropischen Amerika heimisch sind; die fünfgliederigen, haplostemonen Blüten haben eine röhrige Achse; Carpelle drei; Kapsel dreiklappig; Kräuter oder Holzgewächse. Turnera.

Die folgenden Familien sind sehr selbständig ohne nähere Verwandtschaft zu einander und zu den vorigen Familien, so daß auf jede von ihnen eine besondere Unterreihe gegründet werden kann. Ihre Stellung am Schluß der Parietalen ist nicht zweifelsohne.

Passifloraceae. Die meist großen und schönen Blüten haben eine Wucherung der Blütenachse (Korona) in Form von freien oder verwachsenen Fäden oder einer Röhre; Kelchblätter und Petalen meist fünf; Staubblätter meist ihnen gleichzählig; Fruchtknoten oberständig, einfächerig mit vielen Samenanlagen. Krautige oder holzige Gewächse der wärmeren Länder, die mittels Ranken klettern, die an Stelle von Blütenständen stehen.

Passiflora, Passionsblume, artenreich, besonders im tropischen Amerika; der Fruchtknoten steht auf einem Gynophor, dem auch die Staubblätter größtenteils angewachsen sind; die fleischigen Früchte mehrerer Arten eßbar.

Caricaceae. Die Blüten sind diöcisch, fünfgliederig; die Petalen sind in den männlichen Blüten zu einer langen, in den weiblichen zu einer ganz kurzen Röhre vereint; der einfächerige Fruchtknoten mit vielen Samenanlagen entwickelt sich zur Beerenfrucht. Die kleine Familie ist fast ausschließlich im tropischen Amerika entwickelt.

Am bekanntesten ist der Obstbaum Carica papaya (Melonenbaum); der von Milchröhren durchzogene einfache Stamm trägt eine Krone von großen handförmigen Blättern; die Blüten sind achselständig.

Loasaceae. Die Blüten sind ansehnlich, schön gefärbt, ihre Achse ist verschieden ausgebildet, häufig ausgehöhlt; Kelch und Petalen meist fünf, Staubblätter zahlreich, die äußeren vielfach staminodial; Fruchtknoten meist mit vielen Samenanlagen an perietalen oder scheitelständigen Plazenten; die Kapselfrucht ist häufig spiralig gedreht. Die Loasaceae sind im wärmeren und gemäßigten Amerika verbreitet; es sind meist krautige Gewächse, die häufig durch starkwirkende Brennhaare ausgezeichnet sind.

Loasa, Cajophora, Blumenbachia.

Begoniaceae. Die Blüten sind eingeschlechtlich, monöcisch; die Blütenhülle zeigt meist keine Sonderung in Kelch und Blumenkrone; die männlichen Blüten besitzen zwei bis vier Hüllblätter und viele Staubblätter; bei den weiblichen Blüten wechselt die Zahl der Hüllblätter meist zwischen zwei und fünf, der Fruchtknoten ist unterständig, mehr oder weniger geflügelt, meist von drei Carpellen gebildet, die zahlreiche Samenanlagen tragen; die Plazenten sind wandständig, häufig stark vorspringend und wieder zurückgebogen. Die Begoniacnae sind krautige Gewächse mit häufig bunt gefärbten Blättern, die vorzugsweise feuchte, schattige Wälder der Tropen bewohnen.

Begonia, über 400 Arten, tropisch, viele als Blattpflanzen oder wegen der schönen Blüten in Kultur.

23. Reihe Myrtiflorae. Die Blüten sind zyklisch, heterochlamydeisch, selten apopetal, meist strahlig, mit ein bis zwei Kreisen (selten vielen) Staubblättern; charakteristisch ist die Versenkung des Fruchtknotens in die hohle, mehr oder weniger konkave Blütenachse. Bei den Familien am Anfang der Reihe steht der Fruchtknoten frei in der röhrigen Blütenachse (dem Receptakulum); weiterhin ist der Fruchtknoten mit der hohlen Achse völlig verwachsen, unterständig.

Thymelaeaceae. Blütenachse (Receptakulum) meist zylindrisch, an der Spitze mit den zipfelartigen, gefärbten Kelchblättern; die Blütenblätter sind klein oder fehlen ganz; Staubblätter meist doppelt so viel als Kelchblätter; Fruchtknoten meist einfächerig mit einer hängenden Samenanlage. Die Thymelaeaceae sind vorwiegend kleinere Holzgewächse, die anatomisch durch den weißen seidenartigen Bast ausgezeichnet sind.

Gnidia, mit vielen Arten besonders in Südafrika, Daphne mezereum, Seidelbast, in Wäldern Europas, im ersten Frühling blühend.

Elaeagnaceae. Im Blütenbau der vorigen Familie sehr ähnlich; Blüten eingeschlechtlich oder zwitterig; in den männlichen Blüten ist das Receptakalum nur sehr wenig konkav; Blütenblätter fehlen; Fruchtknoten einfächerig mit einer vom Grunde aufsteigenden Samenanlage. Die Elaeagnaceae sind Holzgewächse, die mit meist silberglänzenden Schuppen- oder Sternhaaren bekleidet sind.

Hippophaës rhamnoides, Sanddorn, im mittleren und nördlichen Europa und Asien, diöcisch; Elaeagnus, zwitterig.

Lythraceae. Die Blütenachse ist schüsselförmig bis langröhrig; die Kelchblätter sind klappig, die Petalen wechseln mit ihnen ab; Staubblätter doppelt soviel als Petalen oder weniger; Fruchtknoten frei, gefächert, mit vielen Samenanlagen, Frucht trocken. Die Lythraceae sind Kräuter oder Holzgewächse mit meist gegenständigen Blättern; sie sind vorzugsweise in den Tropen entwickelt.

Lythrum salicaria, weitverbreitete Sumpfpflanze, durch Heterostylie ausgezeichnet;

Lagerströmia indica, bekannter Zierstrauch wärmerer Länder; Lawsonia inermis, von Afrika bis zum östlichen Asien, liefert die Henna, ein kosmetisches Färbemittel.

Punicaceae. Punica granatum, der Granatapfelbaum, der diese Familie repräsentiert, ist in östlichen Mediterrangebiet heimisch, in wärmeren Ländern viel kultiviert. Die schönen Blüten haben 5 bis 8 Kelch- und Blumenblätter und viele Staubblätter; der Fruchtknoten ist mit der Achse verwachsen, mehrfächerig, mit vielen Samenanlagen; die Frucht, an der die Kelchblätter stehen bleiben, hat eine dicklederige Schale und saftiges Fruchtfleisch; die bittere Wurzelrinde ist offizinell.

Lecythidaceae. Die Lecythidaceae sind Holzgewächse der Tropen, häufig sehr hohe Urwaldbäume. Die Blüten sind zwitterig, mit becherförmiger Achse, mit der der Fruchtknoten vereint ist; Staubblätter zahlreich. Bertholletia excelsa im Amazonasgebiet liefert in ihren Samen die sogenannten Paranüsse; der Anfangs geschlossene Kelch reißt in Lappen auf; die Staubblätter bilden eine Röhre mit helmförmigen Anhang; die große holzige Frucht öffnet sich durch Abfallen eines Deckels und enthält zahlreiche kantige Samen.

Rhizophoraceae. Zu den Rhizophoraceae gehören eigentümliche, an besondere Lebensbedingungen angepaßte Holzgewächse der Tropen, die mit Arten anderer Familien die Mangrove-Formation zusammensetzen. Unter Mangrove versteht man Wälder und Gebüsche an schlammigen Küsten der Tropen, die zur Flutzeit von Wasser bedeckt werden. Die bekannteste dieser Pflanzen ist Rhizophora mangle. Der Stamm der Rhizophora-Arten wird von einem Gerüst bogenförmiger Stelzwurzeln gestützt, die den Stamm in dem schwanken Substrat befestigen; von den Aesten wachsen ferner Luftwurzeln in den Boden herab. Die Blüten stehen in axillären Infloreszenzen; die Blütenachse ist konkav, meist mit dem Fruchtknoten verwachsen; die Frucht der Rhizophora-Arten ist einsamig, beerenförmig; der Same keimt, während die Frucht noch am Stamme hängt, das Hypokotyl, das keulenförmige Gestalt hat, wird bis halbmeterlang, ehe es vom Stamm abfällt und sich in den Schlamm einbohrt, worauf der Keimling sogleich wurzelt. Rhizophora hat mehrere Arten in den Tropen der ganzen Welt.

Combretaceae. Die Blüten stehen in reichblütigen Aehren oder Rispen; die Aehre ist im unteren Teil mit dem Fruchtknoten verwachsen, über diesen hinaus meist röhrenförmig verlängert; Blütenblätter klein, häufig fehlend; Staubblätter meist so viel oder doppelt so viel als Kelchblätter; Fruchtknoten einfächerig mit mehreren hängenden Samenanlagen; Frucht einsamig, häufig geflügelt. Die Combretaceae sind Holzgewächse der wärmeren Länder mit einfachen abwechselnden Blättern.

Terminalia catappa, Tropen der Alten Welt; Combretum, gegen 300 Arten, tropisch und subtropisch.

Myrtaceae. Die Blüten sind zwitterig, strahlig; die Achse ist meist völlig mit dem Fruchtknoten verwachsen, der unterständige Fruchtknoten gefächert, mit vielen Samenanlagen; Kelch- und Blumenblätter vier bis fünf, Staubblätter zahlreich; die Frucht ist verschieden, beerenartig oder trocken. Die Myrtaceae sind Holzgewächse mit meist gegenständigen, lederigen Blättern;



Fig. 70. Blüte von Myrtus communis. Nach Wettstein.

die Blüten stehen einzeln in den Blattachseln oder in Rispen; anatomisch sind die Myrtaceae durch Oeldrüsen charakterisiert. Die sehr artenreiche Familie bewohnt wärmere Länder; besonders ist sie im tropischen Amerika und in Australien entwickelt.

Myrtus communis, Myrte, einzige mediterrane Art der Familie; Psidium guayava, Goyave, Obstbaum, im tropischen Amerika heimisch; Jambosa caryophyllus, auf den

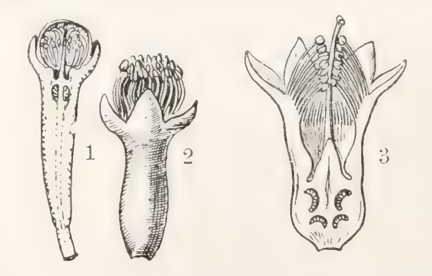


Fig. 71. 1 Jambosa caryophyllus. Knospe halbiert. 2 Dieselbe. Geöffnete Blüte. 3 Punica granatum. Blüte längsdurchschnitten.

Molukken heimisch, viel in den Tropen kultiviert, liefert in den getrockneten Blütenknospen die Gewürznelken (Nägelchen); Eucalyptus, artenreich in Australien, vielfach Bäume von gigantischer Höhe, die vortreffliches Nutzholz geben; der Kelch ist undeutlich oder fehlt, die Blütenblätter sind zu einer im ganzen abfallenden Haube verwachsen, nach deren Abfallen die eingekrümmten Staubblätter sich ausbreiten; Melaleuca leucadendron, Baum im tropischen Asien, liefert Kajeputöl.

Melastomataceae. Die häufig schön gefärbten und ansehnlichen Blüten stehen

meist in reichen cymösen Infloreszenzen; sie sind heterochlamydeisch, meist strahlig; der Fruchtknoten ist unterständig, meist gefächert mit vielen Samenanlagen; charakteristisch ist die mannigfache Ausbildung, die das Konnektiv der Antheren erfährt, es ist verbreitert oder in die Länge gezogen, mit den verschiedenartigsten Anhängseln versehen, die Antheren öffnen sich meist mit Gipfelporen.

Die Melastomataceae sind Kräuter oder Holzgewächse der wärmeren Länder, in den Tropen mit vielen artenreichen Gattungen entwickelt, gegen 2000 Arten; die Blätter sind gegenständig und zeigen eine sehr regelmäßige, ausgeprägte Nervatur.

Onagraceae. Die Blütenachse ist verlängert, meist zylindrisch, in ihrem unteren Teile mit dem Fruchtknoten völlig verwachsen, der obere Teil oberhalb des Fruchtknotens zuletzt abfallend; Kelch- und Blumenblätter zwei bis vier, Staubblätter meist doppelt so viel; Fruchtknoten gefächert, gewöhnlich mit vielen Samenanlagen an zentralwinkelständigen Plazenten; die Frucht ist meist eine fachspaltige vielsamige Kapsel.

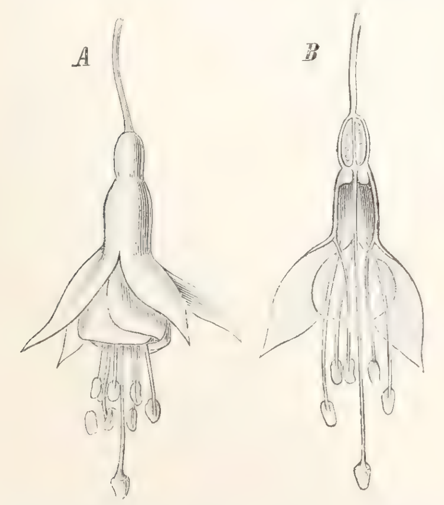


Fig. 72. Blüte von Fuchsia. Fruchtknoten unterständig mit vielen Samenanlagen.

Die Onagraceae sind krautartige Gewächse mit gegenständigen oder abwechselnden Blättern und lebhaft gefärbten Blüten, die einzeln axillär stehen oder bei Reduktion der Tragblätter ährige oder traubige Blütenstaude bilden.

Epilobium; Fuchsia, Fuchsie, artenreich in den Anden, mehrere als schönblühende Topfpflanzen in Kultur; Oenothera, 100 in Amerika, mehrere nach Europa eingeschleppt, Oenothera biennis, Nachtkerze, Oenothera Lamarckiana, mit welcher Art De Vries seine bekannten Mutationsexperimente anstellte.

Halorrhagaceae. Die Blüten sind meist sehr klein, vier- oder wenigerzählig, heterochlamydeisch, häufig apopetal; Fruchtknoten unterständig, ein bis vierfächerig mit wenigen Samenanlagen. Die Halorrhagaceae sind krautartige Gewächse von sehr verschiedenem Habitus, in gemäßigten Gegenden heimisch.

Myriophyllum, Wasserpflanzen mit häufig quirlständigen Blättern; Gunnera, krautige Pflanzen von öfters riesiger Größe mit rundlichen Blättern, und reichem Blütenstand, besonders in Südamerika und auf Neuseeland.

24. Reihe Umbelliflorae. Die meist in Dolden stehenden Blüten sind strahlig oder schwach zygomorph, haplochlamydeisch; der Kelch ist schwach entwickelt; der unterständige Fruchtknoten wird meist von zwei Carpellen (selten mehr) gebildet, die eine Samenanlage tragen; Samen mit reichlichem Nährgewebe.

Araliaceae. Die Blüten der Araliaceae sind meist fünfgliederig; der Kelch ist unansehnlich; Carpelle häufig den Petalen gleichzählig, aber auch andere Zahlen; Fruchtknoten oben mit einem Diskuspolster bekleidet, mit je einer Samenanlage im Fach; Griffel mehrere frei oder verwachsen. Die Araliaceen sind vorzugsweise in wärmeren Ländern heimisch; sie sind Holzgewächse mit häufig handförmig gelappten oder gefiederten Blättern; die Blüten stehen in kleinen Dolden, die meist zu großen Trauben oder Rispen zusammentreten.

Hedera helix, Efeu, Europa, mittels negativ heliotropischer Haftwurzeln kletternd; Tetrapanax papyrifer, in Ostasien kultiviert, liefert im Marke „Reispapier"; Panax ginseng, in Korea und der Mandschurei, liefert die in China als Heilmittel berühmte Ginsengwurzel.

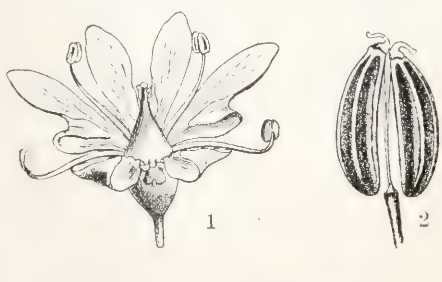
Umbelliferae. Die Blüten der Umbelliferae sind strahlig oder durch stärkere Entwickelung einiger Petalen schwach zygomorph; der unterständige Fruchtknoten wird von zwei Carpellen mit je einer hängenden Samenanlage gebildet; über jedem Carpell die drüsige Griffelscheibe (Griffelpolster, Stylopodium); Griffel zwei, frei; Kelch schwach entwickelt oder nur angedeutet; die Petalen entspringen unterhalb der Griffelscheibe; Staubblätter fünf; die trockene, schließfruchtartige, zweisamige Frucht zerfällt in zwei einsamige, sich voneinander trennende, vom Griffel und Kelchrest gekrönte Teilfrüchte (Merikarpien). Die Umbelliferae sind meist krautartige Gewächse, deren Blätter breite, den Stengel umfassende Scheiden haben; die Spreite ist meist einfach bis mehrfach gefiedert; die Blüten stehen in einfachen oder zusammengesetzten Dolden, die meist am Grunde von Hüllblättern umgeben sind. Die Familie ist besonders in den nördlich-extratropischen Gebieten, dann in

Südafrika und auf den südlichen Anden verbreitet.

Bei der großen Uebereinstimmung der Umbelliferae in Habitus und Blütenbau ist eine sichere Unterscheidung der Gattungen nur nach den Merkmalen der Frucht möglich; an dieser werden unterschieden: 1. die Fuge (commissura), die Verwachsungsstelle der beiden Merikarpien; 2. die Rippen (juga, costae), und zwar an jeder Teilfrucht fünf Hauptrippen (juga primaria), von denen drei auf dem Rücken und zwei seitlich nach der Fuge stehen, und ferner die (häufig vorhandenen) Nebenrippen (juga secundaria) zwischen den Hauptrippen; 3. die Rillen oder Tälchen, die Vertiefungen zwischen den Hauptrippen; 4. die Oelstriemen oder Oelgänge, die schlauchförmig sind und normal im Gewebe in den Tälchen und an den Berührungsflächen der Merikarpien liegen; der kleine Embryo liegt in reichlichem, ölhaltigem Nährgewebe.



Fig. 73. Fruchtknoten von Conium maculatum mit hängenden Samenanlagen im Längsschnitte. Nach Tschirch-Österle.



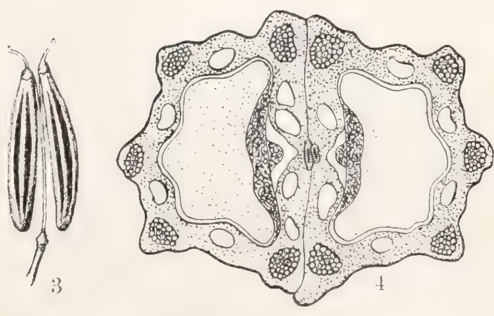


Fig. 74. 1 Blüte von Coriandrum sativum. 2 Frucht von Carum carvi. 3 Frucht von Chaerophyllum bulbosum. Nach Wettstein. 4 Frucht von Foeniculum officinale im Längsschnitt, die Merikarpien mit 5 Hauptrippen, die Oelstriemen sind hell gehalten. Nach Drude.

Unterfamilie Hydrocotyloideae. Frucht mit holzigem Endokarp; Oelstriemen fehlend oder in den Hauptrippen. Azorella; die Arten gehören zu den auffallendsten Polsterpflanzen der Anden und Neuseelands; sie bilden feste Polster von oft riesigem Umfang mit zahllosen dicht gedrängten Aesten; die Blüten stehen in kleinen einfachen an der Spitze der Aeste versteckten Dolden.

Unterfamilie Saniculoideae. Frucht mit weichem Endokarp, Exokarp mit Schuppen oder Stacheln; Griffel vom Stylopodium umwallt; Oelstriemen verschieden. Sanicula, Frucht mit hakigen Stacheln, Blätter einfach, Sanicula europaea; Eryngium, mit stacheligen Blättern, die Dolden köpfchenförmig; besonders in Amerika, in Europa Eryngium maritimum, Männertreu, bekannte Küstenpflanze.

Unterfamilie Apioideae. Frucht mit weichem Endokarp, das bisweilen durch subepidermale Holzschichten nußartig verhärtet ist; Griffel auf dem Stylopodium stehend; Oelstriemen verschieden. Chaerophyllum, Merikarpien mit wenig vorspringenden Rippen und großen Oelstriemen in den Riefen; Anthriscus, Merikarpien nur an der Spitze gerippt, Oelstriemen sehr zart, Anthriscus silvester, Europa, Anthriscus cerefolium, Kerbel, im Mittelmeergebiet heimisch; Coriandrum, Merikarpien zu einer nußartigen Frucht verbunden, mit holziger Mesokarpschicht und wenig vortretenden Rippen, Coriandrum sativum, Koriander, mediterran; Conium, die Merikarpien hängen nur an einer schmalen Fugenfläche zusammen, fünf vorspringende Rippen, keine Oelstriemen, Conium maculatum, Schierling, giftig, nördlich-extratropisch; Apium, Frucht niedrig, Merikarpien mit fünf dicken Rippen und großen Oelstriemen, Apium graveolens, Sellerie, weit verbreitet, wild auf salzhaltigem Boden; nahe verwandt Petroselinum, Petrolselinum sativum, Petersilie, wild in Südeuropa; Cicuta, mit großen Kelchzähnen, Rippen der Merikarpien breit und flach, Cicuta virosa, Wasserschierling, giftig, nördlich extratropisch; Carum, Frucht von der Seite abgeflacht, Merikarpien mit vorspringenden Rippen, Oelstriemen vorhanden, Carum carvi, Kümmel, weit verbreitet; Pimpinella, Merikarpien mit fünf schmalen Hauptrippen, Oelstriemen zahlreich, zart, Pimpinella anisum, Anis im östlichen Mediterrangebiet heimisch; Foeniculum, Merikarpien mit fünf dicken, stumpfen Rippen, Oelstriemen einzeln in den Tälchen, Foeniculum vulgare, Fenchel, in Südeuropa; Anethum graveolens, Dill, wie vorige gelbblühend, durch breitere Randrippen der Frucht unterschieden; Aethusa, mit eirunden Früchten, mit dicken, gekielten Rippen, Aethusa cynapium, Hundspetersilie, giftig, in Europa als Unkraut verbreitet; Archangelica, Merikarpien stark abgeflacht, Frucht mit vier Randflügeln, Archangelica officinalis, in den Gebirgen Europas (Radix Angelicae); Pastinaca, mit schmal geflügelten Früchten, Pastinaca sativa, Pastinak, Europa, Ferula, Frucht mit zwei Flügeln, die von den verbundenen Randrippen gebildet werden; die Gattung ist im östlichen Mediterrangebiete verbreitet, die

Arten sind oft gewaltige baumhohe Stauden, Ferula assa foetida und andere Arten liefern Asa foetida; Daucus, Frucht geflügelt, die Rippen borstig oder gestachelt, mit Nebenrippen, unter diesen die Oelstriemen, Daucus carota, Mohrrübe, Möhre, in Europa und Asien verbreitet.

Cornaceae. Die Blüten sind klein, strahlig, mit kleinem oder ganz reduziertem Kelch; der unterständige Fruchtknoten ist ein- bis dreifächerig, jedes Fach mit einer hängenden Samenanlage; die Oberseite bedeckt ein Diskus. Die Cornaceae sind Holzgewächse mit einfachen Blättern, deren Blüten in Rispen oder Köpfchen stehen.

Cornus mas, Kornelkirsche, Blüten in Dolden, vor den Blättern erscheinend, Steinfrucht zweisamig, in Europa und Asien; Aucuba japonica, Japan, Zierpflanze; Helwingia, Sträucher im Himalaya und in Ostasien, mit den Blüten auf dem Blatt-Mittelnerv.

b. Unterklasse Sympetalae. Die Blütenhülle ist doppelt, die Petalen sind miteinander verwachsen. Sehr selten kommen als Ausnahme freie Petalen vor bei Gattungen, deren nächste Verwandte sympetal sind, wie auch bei einzelnen zu den Choripetalen zu rechnenden Gattungen die Stufe der Sympetalie erreicht wird. Wir beginnen mit Reihen, bei denen noch gelegentlich Choripetalie vorkommt und häufig zwei Staubblattkreise entwickelt sind; die Staubblätter entspringen hier meist nicht wie bei den typischen Sympetalen in der Blumenkronenröhre, sondern am Grunde.

1. Reihe Ericales. Die Blüten sind meist fünfgliederig und aktinomorph; das Androeceum ist obdiplostemon (d. h. die Staubblätter des äußeren Kreises stehen vor den Petalen), oder der äußere Kreis ist nicht entwickelt; die Staubblätter sind meist von der Blumenkrone frei; der Fruchtknoten ist mehrfächerig, oberständig bis unterständig.

Clethraceae. Die Blüte hat fünf freie Petalen. Staubblätter sind zehn vorhanden, der Fruchtknoten ist dreifächerig mit vielen Samenanlagen; trotz der freien Petalen wird die Familie in die Nähe der Ericaceen gestellt, weil die Fächer der Antheren mit Gipfelporen sich öffnen und die Frucht wie bei manchen Ericaceen eine dreiklappige Kapsel ist, deren Scheidewände auf der Mitte der Klappen stehen und sich so von der Mittelsäule der Frucht ablösen. Kleine Bäume oder Sträucher mit traubigen Blütenständen; die Gattung Clethra hat ungefähr 30 Arten in Amerika, Ostasien und auf Madeira.

Pirolaceae. Die Pirolaceae haben vier- bis fünfgliederige, obdiplostemone, aktinomorphe Blüten mit oberständigen Fruchtknoten und freien oder verwachsenen Petalen; der aus vier bis fünf Carpellen gebildete Fruchtknoten ist unvollkommen gefächert, die Plazenten sind dickfleischig und tragen eine große Zahl sehr kleiner Samenanlagen; die Pirolaceen sind niederige perennierende, krautige Gewächse, blaßgrün oder chlorophyllos; ihre Verbreitung ist boreal in Wäldern Europas, Asiens und Nordamerikas.

Pirola; Chimophila; Monotropa hypopitys, Fichtenspargel.

Ericaceae. Die Blüten der Ericaceae sind aktinomorph, meist fünfgliederig, obdiplostemon; zwischen den Kelchzipfeln breitet sich ein Diskus, an dessem Rande die Staubblätter stehen; die Antheren springen am Gipfel mit runden oder spaltenförmigen Poren auf und haben häufig borsten- oder hörnchenförmige Anhängsel; der Fruchtknoten ist vier- bis fünffächerig, oberständig oder unterständig und entwickelt sich zu einer Beere oder Kapsel. Die Ericaceae sind größtenteils niedrige Holzgewächse, immergrüne Sträuchlein mit häufig schmalen, nadelförmigen Blättern; sie sind über die Erde verbreitet, in den Tropen meist in den Gebirgen entwickelt.

In der Unterfamilie der Rhododendroideae ist die Frucht eine scheidenwandspaltige Kapsel; der Fruchtknoten ist oberständig; Petalen öfters frei oder nur wenig vereint; Antheren ohne Anhängsel. Ledum, Rhododendron (zahlreiche Arten in Ostasien, in den Alpen Rhododendron ferrugineum und Rhododendron hirsutum, Alpenrosen); Azalea. In der Unterfamilie der Arbutoideae ist der Fruchtknoten oberständig, die Frucht ist eine Beere oder Kapsel; Antheren meist mit Anhängseln. Andromeda; Arbutus unedo, Erdbeerbaum des Mittelmeergebietes; Arctostaphylos. In der Unterfamilie der Vaccinioideae ist der Fruchtknoten unterständig, die Frucht eine Beere; Antheren mit Anhängseln; Vaccinium myrtillus, Heidelbeere, Vaccinium vitis idaea, Preißelbeere. In der Unterfamilie der Ericoideae ist der Fruchtknoten oberständig, die Frucht eine meist fachspaltige Kapsel; Antheren mit Anhängseln; die trockenhäutige Blumenkrone bleibt nach dem Verblühen stehen. Calluna vulgaris, Heidekraut; Erica, mit

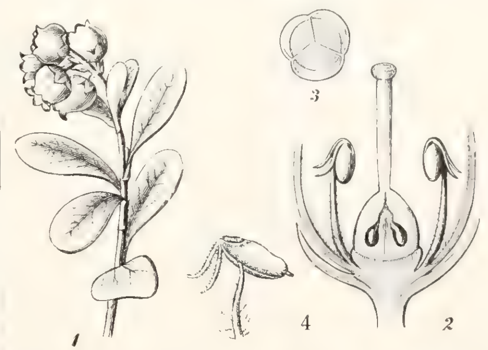


Fig. 75. Arctostaphylos uva ursi. 1 Blühender Zweig; 2 Blüte im Längsschnitt; 3 Pollentetrade. Nach Berg und Schmidt. 4 Anthere von Arbutus Unedo. Nach Wettstein.

einigen Arten in Westeuropa und dem Mittelmeergebiet, und über 400 Arten im Kapland.

Epacridaceae. Die vorzugsweise in Australien entwickelte Familie der Epacridaceae schließt sich an die Ericaceen an; Staubblätter fünf, häufig mit der Röhre der Blumenkrone vereint, die Theken öffnen sich durch einen gemeinsamen Längsspalt; die Frucht ist eine fünfklappige Kapsel oder fleischig mit einem bis mehreren Steinkernen: Sträucher oder Halbsträucher; Epacris.

Diapensiaceae. Im Blütenbau den vorigen verwandt; Diskus fehlend, Staubblätter am Schlunde der Blumenkrone entspringend, fünf fruchtbare mit fünf Staminodien abwechselnd.

Diapensia lapponica, rasenförmig wachsender Halbstrauch, circumpolar verbreitet.

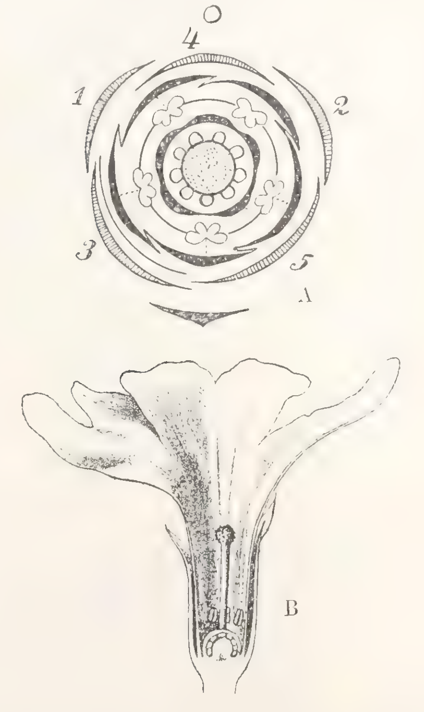


Fig. 76. A Diagramm von Primula. Nach Eichler. B Primula Clusiana, Längsschn. durch eine langgriffelige Blüte. Nach Wettstein.

2. Reihe Primulales. Besonders charakteristisch ist für die Reihe der einfächerige Fruchtknoten mit basaler oder zentral gestellter Plazenta mit mehreren bis vielen Samenanlagen; die Petalen der fünfgliederigen Blüten sind allermeist verwachsen, Staubblätter meist fünf epipetal gestellt. Die Samenanlagen sind trotz der freien Plazenta nicht axillären Ursprungs, sondern die Carpelle sind an der zentralen Säule heraufgewachsen und mit ihr vereint; an ihnen entspringen die Samenanlagen (analoge Fälle bei den Caryophyllaceen).

Primulaceae. Die Blüten sind allermeist aktinomorph, die Blumenkrone häufig röhrig; Samenanlagen zahlreich an der freien Plazenta; krautartige Gewächse mit Einzelblüten oder doldigen oder traubigen Blütenständen; die Familie ist nur auf der nördlichen Hemisphäre entwickelt.

Primula, Blüten doldig an einem terminalen Schaft; zahlreiche Arten in den Gebirgen; Androsace, Soldanella, Lysimachia, Anagallis; Cyclamen, mit Knollen, Abschnitte der Blumenkrone zurückgeschlagen, im Mediterrangebiet und den Gebirgen Mitteleuropas.

Myrsinaceae. Im Gegensatz zu den Primulaceen sind die Myrsinaceae Holzgewächse der wärmeren Länder; die Blüten sind aktinomorph; Samenanlagen wenige bis zahlreich an basilärer oder zentraler Plazenta; die Frucht ist meist steinfruchtartig mit einem bis wenigen Samen.

Maesa, Ardisia; Aegiceras majus, Mangrovepflanze der alten Welt.

Von den Myrsinaceen wurden neuerdings als eigene Familie abgetrennt die Theophrastaceae. Die Blüten sind zweigeschlechtlich oder diöcisch; fünf episepale Staminodien stets vorhanden; Samenanlagen zahlreich an der meist zentralen Plazenta. Der Habitus der tropisch-amerikanischen Gewächse ist charakteristisch, indem die Blätter an den Enden der Aeste oder der unverzweigten Stämme gedrängt sind. Theophrasta.

3. Reihe Plumbaginales. Die Reihe ist von der vorigen besonders unterschieden durch das Vorkommen von nur einer basilären umgewendeten Samenanlage im einfächerigen Fruchtknoten, der von fünf Carpellen gebildet wird; fünf Staubblätter epipetal; Blüten aktinomorph, Petalen öfters nur sehr wenig verwachsen. Einzige Familie Plumbaginaceae. Die Plumbaginaceen sind krautartige oder halbstrauchige Gewächse, die meist typische Halophyten, auf Salzsteppen und an Meeresküsten besonders verbreitet sind; Blütenstände meist aus Wikkeln zusammengesetzt.

Acantholimon, mediterran; Armeria, mit kopfigem Blütenstand, in der nördlich gemäßigten Zone und andin, Statice, in allen Erdteilen.

4. Reihe Ebenales. In der Reihe der Ebenalen sind die Blüten stets sympetal; die Staubblätter stehen selten nur in einem Kreis; meist sind sie in größerer Anzahl vorhanden; der Fruchtknoten hat zentralwinkelständige Plazenten mit einer bis wenigen Samenanlagen. Die Ebenales sind tropische oder subtropische Holzgewächse.

Sapotaceae. Die Blüten sind meist zwitterig und strahlig; Petalen soviel als Kelchblätter oder doppelt so viel in zwei Kreisen; die Staubblätter stehen in zwei bis drei Kreisen, entweder alle fruchtbar oder zum Teil staminodial; Fruchtknoten

in jedem Fach mit einer Samenanlage, die nicht alle entwickelt werden; die Frucht ist eine Beere. Die Sapotaceae sind tropische Bäume mit lorbeerartigem Laub, anatomisch durch Milchsaftschläuche in Mark und Rinde charakterisiert.

Obstpflanzen wie Achras sapota, dann aber besonders als Guttapercha liefernde Nutzpflanzen wichtig, Palaquium und Payena indisch-malayisch.

Ebenaceae. Die Blüten sind meist eingeschlechtlich, drei- bis siebenzählig, Staubblätter doppelt so viel als Korallenzipfel oder zahlreich; Fruchtknotenfächer mit ein bis zwei Samenanlagen; die Frucht ist beerenartig fleischig; Sträucher oder Bäume, besonders in der alten Welt.

Diospyros mit zahlreichen Arten, die die Hauptmenge des Ebenholzes liefern; Diospyros kaki (Kakipflaume), Obstbaum in Ostasien.

Styracaceae. Die Kelchblätter der Styracaceae sind verwachsen, die Röhre mit kurzen Zipfeln; die Petalen sind nur am Grunde verwachsen; Staubblätter doppelt so viel als Petalen, am Grunde verwachsen; der Fruchtknoten ist oberständig oder halbunterständig, unvollkommen gefächert; die Frucht ist eine Steinfrucht oder trockene Schließfrucht mit einem oder wenigen Samen; Holzgewächse, deren Blätter mit Sternhaaren bekleidet sind.

Styrax im tropischen und subtropischen Amerika und im östlichen Asien, nur Styrax officinalis im östlichen Mediterrangebiet (Styrax-Harz).

Nahe verwandt ist die kleine Familie der Symplocaceae. Hier ist der Fruchtknoten typisch unterständig und vollkommen gefächert, vor jedem Blumenblatt steht ein ganzes Bündel von Staubblättern.

Die Gattung Symplocos ist mit 300 Arten in den Tropen und Subtropen verbreitet.

In den nun folgenden Reihen ist die Sympetalie mit wenigen Ausnahmen herrschend; stets ist nur ein Kreis von Staubblättern vorhanden; Oberständigkeit des Fruchtknotens vorwiegend.

5. Reihe Contortae. Die Petalen sind in der Knospenlage meist gedreht, Carpelle zwei mehr oder weniger verwachsen. Zur Reihe gehören Holzgewächse oder Kräuter mit meist gegenständigen Blättern meist ohne Nebenblätter.

Oleaceae. Der wichtigste Charakter der Familie liegt in dem Vorkommen von nur zwei Staubblättern mit großen Antheren, die mit der Kronröhre vereint sind; zwei Carpelle wechseln mit den Staubblättern ab; in jedem Fache sind zwei Samenanlagen.

Fraxinus, Esche, bei der Sektion Fraxinaster (Fraxinus excelsior usw.) fehlt die Krone (apopetal), Fraxinus ornus, Mannaesche mit Krone; Syringa, Flieder, Lilak, im östlichen Europa heimisch; Olea europaea, Oelbaum des Mediterrangebietes; Jasminum, aufrechte oder häufig windende Holzgewächse, 150 Arten in den Tropen und Subtropen.

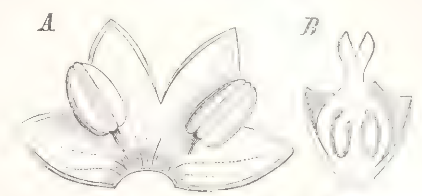


Fig. 77. Olea europaea. A Ausgebreitete Krone. B Kelch und Fruchtknoten im Längsschnitt. Vergrößert. Nach Engler-Prantl.

Loganiaceae. Die sympetale Blumenkrone ist von sehr verschiedener Gestalt; die Staubblätter sind meist den Petalen gleichzählig, in der Röhre oder am Schlunde angeheftet; Carpelle zwei oberständig, meist mit vielen Samenanlagen; die Frucht ist eine Kapsel oder beeren- oder steinfruchtartig.

Die Familie umfaßt recht heterogene Gruppen und ist als polyphyletisch anzusprechen. Ihre Verbreitung ist fast ganz tropisch. Am bemerkenswertesten ist die Gattung Strychnos; sie besitzt baum- oder strauchförmige, öfters schlingende und häufig mit spiralig eingerollten Ranken kletternde Arten; die kugelige Frucht ist hartschalig mit weichem Fruchtfleisch und mehr oder weniger zahlreichen Samen; eine Reihe von Arten sind stark wirkende Giftpflanzen (Curare, Pfeilgift aus der Rinde amerikanischer Formen); Strychos nux vomica, Brechnußbaum in Indien (Semina Strychni).

Gentianaceae. Die Blüten der Gentianaceae sind meist strahlig, fünfgliederig, die Kelchblätter sind frei oder vereint; der Fruchtknoten ist meist einfächerig mit wandständigen Plazenten oder zweifächerig; Samenanlagen zahlreich; Frucht eine Kapsel. Die Gentianaceae sind meist krautartig, mit gegenständigen Blättern und cymösen Blütenständen; Bitterstoffe in allen Teilen der Pflanzen. Ihre Verbreitung erstreckt sich

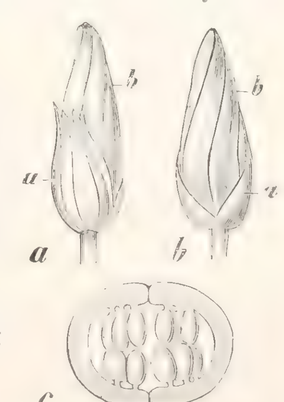


Fig. 78. Gentiana lutea. a und b Blütenknospe mit Kelch (a) und der gedrehten Krone (b). Natürliche Größe. Fruchtknoten im Querschnitte vergrößert. Nach Berg und Schmidt.

über die ganze Erde, doch sind sie vorzugsweise in temperierten Gegenden entwickelt.

Gentiana, 400 Arten, auch zahlreich in den tropischen Gebirgen Asiens und auf den Anden; Sweertia; Erythraea; Menyanthes trifoliata, Bitterklee; Voyria, kleine Saprophyten im tropischen Amerika.

Apocynaceae. Die Blüten sind fünfgliederig, die Petalen in der Knospenlage gedreht; die Korolle ist meist trichterig oder präsentiertellerförmig; die Staubblätter sind in der Röhre befestigt, mit kurzen Staubfäden, die Antheren neigen häufig kegelförmig zusammen, sind auch oft mit dem Stempel verklebt; die beiden Carpelle, die viele Samenanlagen enthalten sind verwachsen oder mehr oder weniger frei und dann nur durch den Griffel verbunden; die Frucht besteht meist aus zwei Teilfrüchten, die balgkapselartig aufspringen oder ist beerenartig; Samen meist mit Haarschopf. Die Apocynaceae sind krautige oder holzige Gewächse, häufig Lianen, stets mit ungegliederten Milchröhren; sie sind vorzugsweise tropisch, in beiden Weltteilen, am weitesten nach Norden geht Vinca minor (England und Norddeutschland).

Nerium oleander im Mittelmeergebiet. Zu den Apocynaceae gehören wichtige Kautschuklianen Afrikas, besonders aus der Gattung Landolphia; die Frucht ist hier eine Beere; zahlreiche Literatur (vgl. P. Reintgen, Beih. Tropenpflanzer VI 1905). Ferner sind in der Familie viele Giftpflanzen, besonders die Gattung Strophanthus, zu der meist Kettersträucher gehören, deren Blüten bandartig verbreiterte Petalenzipfel haben (Strophanthus hispidus, Strophanthus Kombe); die großen, trocknen Teilfrüchte spreizen und enthalten zahlreiche Samen mit Haarschopf (Semina Strophanthi).

Asclepiadaceae. Die Ascepliadaceae sind im Blütenbau den Apocynaceen nächst verwandt, nur durch ihre eigentümliche Anpassung an Insektenbestäubung durchgreifend verschieden. Die beiden Carpelle, die viele Samenanlagen enthalten, sind im unteren Teil frei, so daß also das Gynoeceum apokarp ist; sie sind nur durch die dicken Griffel vereint, die an ihrem Ende den „Narbenkopf" bilden, an dessen Unterseite die empfängnisfähigen Narbenflecke liegen. Die sitzenden Antheren sind nun mit dem Gynoeceum vereint; beide bilden zusammen das „Gynostegium". Die Pollenkörner der Antherenfächer sind zu Pollinien verbunden; die Uebertragung geschieht durch die „Translatoren", die aus dem kleinen rundlichen Klemmkörper und aus den Armen bestehen, die mit den Pollinien verbunden sind. Bei Asclepias z. B. neigen die Antheren mit ihren Spitzen über den dicken Narbenkopf; am Grunde haben die Antheren je ein der Gynostegiumbasis angeheftetes großes kappenförmigesAnhängsel, aus dessen Höhlung ein hornförmiges Gebilde aufsteigt. Die Klemmkörper liegen am Narbenkopf zwischen den Antheren und haben zwei Arme, durch die sie mit je einem Pollinium zweier benachbarter Antheren in Verbindung stehen. Ein besuchendes Insekt zieht die Klemmkörperchen mit den anhaftenden zwei Pollinien heraus. Die Gesamtheit der Anhängsel der Staubblätter wird als Korona bezeichnet; nicht selten ist die Korona auch an der Blumenkrone befestigt und in Form mannigfach gestalteter Anhängsel ausgebildet.

Die Asclepiadaceae sind eine vorwiegend tropische Familie; am weitesten dringt Cynanchum vincetoxicum vor, bis zum südlichen Schweden und Norwegen; sie sind meist krautige Gewächse, häufig windend; stets Milchröhren in der Rinde; auffallend ist die sukkulente Entwickelung einiger Gattungen mit starker Reduktion der Blätter in trockenen Gegenden Afrikas, wodurch ein kaktusähnlicher Habitus entsteht (Stapelia, Caralluma); Asclepias, besonders in Nordamerika; Marsdenia condurango in Ecuador (Condurango-Rinde).

6. Reihe Tubiflorae. Die Reihe der Tubiflorae vereint die am meisten ty-

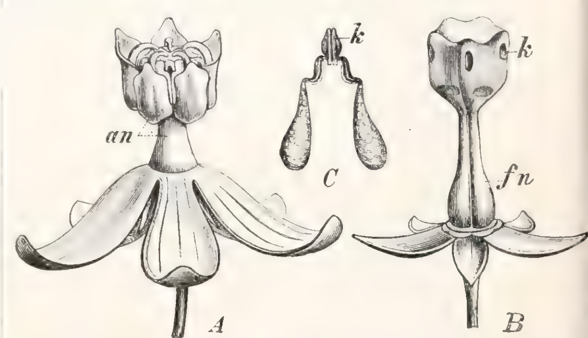


Fig. 79. Asclepias curassavica. A Blüte, an Andröceum. Vergrößerung 4. B Kelch und Gynäceum, fn Fruchtknoten, k Klemmkörperchen. Vergrößerung 6. C Zwei Pollinien. Stärker vergrößert. Nach Baillon.



Fig. 80. Diagramm von Convolvulus sepium. Nach Eichler.

pischen sympetalen Familien; die Blüte ist strahlig oder häufiger zygomorph, von sehr

verschiedener Gestalt; stets ist nur ein Staubblattkreis vorhanden; die Zahl der Carpelle meist auf zwei reduziert.

Convolvulaceae. Bei den Convolvulaceae sind die Blüten noch meist strahlig, mit trichteriger oder glockiger Korolle, fünfgliederig, die Kelchblätter decken dachig; Staubblätter tief in der Röhre angeheftet; Carpelle meist zwei mit je zwei grundständigen und aufrechten Samenanlagen; Frucht meist eine Kapsel. Die Convolvulaceae sind über die Erde verbreitet; meist sind sie krautig, häufig windend, die Cuscutoideae sind blattlose Schmarotzer.

Evolvulus; Convolvulus, die Gattung mit zahlreichen Arten besonders im Mittelmeergebiet; Ipomoea, 300 Arten in den wärmeren Ländern, Ipomoea batatas, wahrscheinlich im tropischen Amerika heimisch, jetzt überall in den Tropen und Subtropen gebaut (Batate oder süße Kartoffel); Exogonium purga, in Mexiko heimisch, liefert Jalapenwurzel; Cuscuta, ein blattloser Parasit mit fädigen Stengeln, die die Nährpflanze umschlingen und Haustorien bilden, 100 Arten in der alten und neuen Welt, Cuscuta epilinum, Cuscuta trifolii.

Polemoniaceae. Die Blüten sind strahlig oder schwach zygomorph, die Blumenkrone trichterig oder glockig; Fruchtknoten meist dreifächerig mit vielen Samenanlagen; ein fadenförmiger Griffel; meist krautige Pflanzen; die Polemoniaceen sind fast ganz auf das nördliche extratropische, besonders westliche Amerika beschränkt.

Cobaea scandens, eine vielkultivierte Kletterpflanze, deren Blätter in Ranken ausgehen; Phlox, Polemonium.

Hydrophyllaceae. Die Hydrophyllaceae sind ebenfalls besonders in Nordamerika entwickelt, weniger in Südamerika und in der Alten Welt; sie sind krautige Gewächse, deren Blüten in Wickeln stehen; die beiden Carpelle sind verwachsen, mit vielen bis zwei sitzenden oder hängenden Samenanlagen.

Phacelia, im westlichen Nordamerika, Nama, Hydrolea.

Borraginaceae. Die Blüten der Borraginaceae sind fünfgliederig, strahlig, seltener zur Zygomorphie neigend; die Petalen decken sich in der Knospe dachziegelig, am Schlunde der Röhre sind häufig Hohlschuppen vorhanden; der Fruchtknoten sitzt auf einer Drüsenscheibe; die beiden Carpelle teilen sich meist frühzeitig durch falsche Scheidewandbildung in vier einsamige Klausen, so daß der Fruchtknoten vierlappig erscheint; diese Einschnürung unterbleibt bei den Cordioideae, wo der Fruchtknoten seine ursprüngliche Gestalt behält und sich zu einer Steinfrucht entwickelt. Die Borraginaceae sind über die Erde verbreitet; sie sind krautig, seltener Holzgewächse, meist rauhhaarig oder borstig, meist mit spiralig gestellten Blättern und wickeligen Blütenständen.

Cordia, Bäume oder Sträucher, 250 Arten in den wärmeren Ländern; Heliotropium, Symphytum, Borrago, Anchusa, Echium, Pulmonaria, Myosotis; Alcanna tinctorea, im Mittelmeergebiet (Radix Alcannae liefert ein Färbemittel für Fette usw.).

Verbenaceae. Die vier- bis fünfgliederigen Blüten sind meist zygomorph, die Blumenkrone häufig zweilippig; Staubblätter meist vier in zwei Paaren; Carpelle zwei mit je einer Samenanlage, selten mehr Carpelle; die Samenanlagen kehren ihre Mikropyle stets nach unten; der ursprünglich zweifächerige Fruchtknoten wird bald durch falsche Scheidewände vierfächerig; die Frucht ist meist eine Steinfrucht und zerfällt in zwei bis vier Teilfrüchte. Die Verbenaceae sind Kräuter oder kleine Holzgewächse, selten Bäume; sie sind fast ganz auf die Tropen und Subtropen beschränkt (Fig. 81).

Verbena, Blütenstand eine dichte Aehre, 100 Arten besonders in Amerika, Verbena officinalis im mittleren Europa und Asien heimisch, weit verschleppt; ebenso Aehren oder Köpfchen bei Lantana und Lippia; baumförmig mit rispigen Blütenständen Tectona grandis, Teakholzbaum, in Ostindien, Hinterindien und Java heimisch; Vitex agnus castus im Mittelmeergebiet, mit fünfteiligen Blättern; Avicennia, Frucht durch Abort einsamig, Mangrovesträucher an den tropischen Küsten.

Labiatae. Die formenreiche Familie der Labiatae zeigt enge Beziehungen zu den Verbenaceen und ist von ihnen kaum sicher zu trennen; die Blüten sind in Kelch und Krone fünfgliederig, zygomorph; der Kelch ist verwachsenblätterig; die Korolle hat einen zweilippigen Saum, zwei Zipfel bilden die oft helmförmige Oberlippe, drei Zipfel die Unterlippe; Staubblätter vier in zwei Paaren oder nur zwei fruchtbar; unter dem Fruchtknoten ein Diskus; Fruchtknoten zweifächerig mit vier Samenanlagen, die die Mikropyle nach unten wenden,, bald durch falsche Scheidewände vierfächerig; die Frucht zerfällt in vier trockene Nüßchen. Die Labiatae sind krautig oder niedrig holzig, mit vierkantigen Stengeln und gegenständigen Blättern, die Blüten stehen in Cymen, die zu Scheinwirteln sich vereinen, in den Achseln der Blätter; häufig sind die Labiatae wohlriechend, mit Drüsen auf der Epidermis. Die Familie ist über die Erde verbreitet mit gegen 3000 Arten; ihre Einteilung ist schwierig, auf wenig durchgreifende Merkmale gegründet.

Rosmarinus officinalis, im Mittelmeergebiet heimisch, Strauch von ericoidem Habitus; Lavandula, Halbsträucher oder Sträucher im Mediterrangebiet; Glechoma, sechs Arten in der alten Welt; Melittis melissophyllum, in

Mittel- und Südeuropa; Galeopsis; Lamium, Taubnessel, 40 Arten in Europa und im außertropischen Asien; Stachys mit 200 Arten weit verbreitet, besonders im Mediterrangebiet; Salvia, mit 500 Arten in den wärmeren und gemäßigten Ländern, Salbei; Staubblätter zwei, mit fadenförmig verlängertem Konnektiv; nur eine Theka ist fruchtbar, die andere bleibt steril; Satureja hortensis, Pfefferkraut; Melissa officinalis, Melisse, mediterran; Origanum majorana, Mairan, mediterran und in Zentralasien;

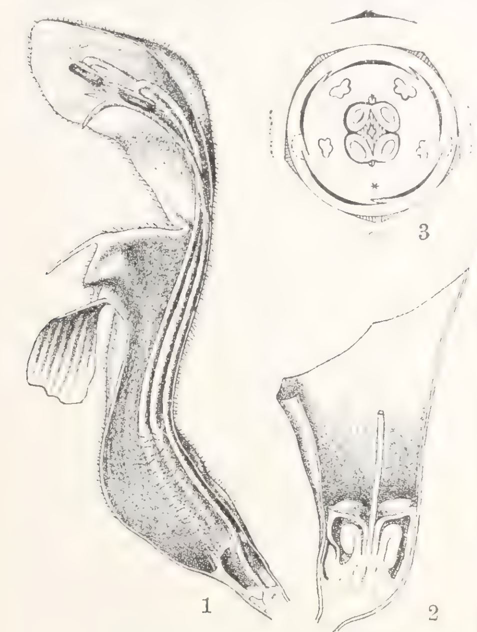


Fig. 81. Blüte von Lamium maculatum, längs durchschnitten. 2 Kelch mit Fruchtknoten von Lamium maculatum im Längsdurchschnitt. Nach Wettstein. 3 Blütendiagramm von Verbena officinalis.

Thymus vulgaris, Thymian; Mentha, ungefähr 15 außerordentlich formenreiche Arten der alten Welt, Mentha pipertia, Pfefferminze, var. crispa, Krauseminze; Pogostemon patchouli, in Indien heimisch, liefert Patschuliöl.

Solanaceae. Die Blüten der Solanaceae sind strahlig oder zygomorph; Staubblätter meist ebensoviel als Zipfel der Blumenkrone; die beiden Carpelle sind schräg zur Medianebene der Blüte gestellt; der Fruchtknoten ist meist zweifächerig mit scheidewandständigen Plazenten mit meist zahlreichen Samenanlagen; Frucht eine Beere oder Kapsel. Die Solanaceae sind meist krautartige Gewächse mit abwechselnden Blättern; in der Blütenregion sind oft die Blätter mit den in ihren Achseln stehenden Sprossen verwachsen und an diesen hinaufgeschoben, so daß öfters die Blätter gepaart erscheinen. Infolge des Gehaltes an Alkaloiden finden viele Salonaceae in der Medizin oder als Genußmittel Verwendung.

Gattungen mit Kapselfrüchten: Datura stramonium, Stechapfel, mit vierklappiger, stacheliger Kapsel, enthält Atropin, in Amerika mehrere baumförmige Arten; Hyoscyamus niger, Bilsenkraut, enthält Hyoscyamin; Nicotiana, Tabak, mit zweiklappiger Kapsel, aus Amerika stammend, besonders zwei Arten in Kultur, Nicotiana tabacum, virginischer Tabak und Nicotiana rustica, Bauerntabak; Petunia, Zierpflanzen, aus Südamerika. Gattungen mit Beerenfrüchten: Atropa belladonna, Tollkirsche, in Europa und Vorderasien, mit blauschwarzen Beeren, enthält Atropin; Physalis, in Europa verbreitet, die rote Beere wird von dem blasig vergrößerten roten Kelch eingeschlossen; Capsicum, mit schwachsaftigen Beeren, spanischer Pfeffer oder Paprika; Solanum, besonders in den Tropen außerordentlich artenreich, Solanum tuberosum, Kartoffel, von den Anden stammend, Solanum lycopersicum, Tomate, aus Südamerika stammend, Solanum melongena, Eierfrucht, Aubergine, in den wärmeren Ländern kultiviert.

Scrophulariaceae. Die Scrophulariaceae haben einen fünfgliederigen Kelch und Blumenkrone; die Kelchblätter sind mehr oder weniger verwachsen, die Blumenkrone ist gewöhnlich zweilippig; Staubblätter meist vier, seltener zwei staminodial oder fehlend; Carpelle zwei median mit meist vielen Samenanlagen an scheidenwandständigen Plazenten; die Frucht ist eine Kapsel oder manchmal eine Beere. Die Scrophulariaceae sind eine formenreiche, über die Erde verbreitete Familie; meist sind sie krautig, mit gegenständigen, seltener abwechselnden Blättern.

Den Uebergang zu den Solanaceen vermitteln die Verbasceae, bei denen die Röhre der Korolle nur sehr kurz und die Blüte fast aktinomorph ist; das 5. Staubblatt ist hier oft vorhanden (Verbascum), doch sind dann die Staubblätter meist ungleich, drei behaart und zwei kahl; Calceolaria, Blütenkrone zweilippig, mit blasig erweiterten Lippen, 200 Arten in Südamerika (Pantoffelblume); Linaria, Antirrhinum, mit vier Staubblättern in zwei Paaren; Paulownia tomentosa (Japan), baumförmig, viel kultiviert; Mimulus, 60 Arten in Amerika, Mimulus luteus in Europa viel verwildert; Veronica, Blüten mit kurzer Röhre und zwei Staubblättern, 200 Arten in den gemäßigten Gegenden; Digitalis, Fingerhut, Digitalis purpurea (Folia digitalis). Unter den Rinantheen finden sich vielfach Halbparasiten, die auf Wurzeln schmarotzen. Melampyrum, Euphrasia, Pedicularis (300 Arten, besonders in Gebirgen der Alten und Neuen Welt). Eine besondere Stellung in der Familie nehmen die Selagineae ein, bei denen der Fruchtknoten nicht aufspringt und die Frucht in zwei einsamige Nüßchen zerfällt; Sträucher oder Halbsträucher mit kleinen Blättern in Kapland, in geringer Zahl auch im tropischen Afrika, Hebenstreitia, Selago.

Bignoniaceae. Die ansehnlichen, schön gefärbten, meist in rispige oder trugdoldige Blütenstände vereinten Blüten haben einen

verwachsenblätterigen Kelch und eine meist glockig-trichterige Blumenkrone; beide sind fünfgliederig; Staubblätter vier, in zwei Paaren; Carpelle zwei mit vielen Samenanlagen; die Frucht ist meist eine (häufig sehr große) Kapsel, deren Klappen sich von der stehenbleibenden Scheidewand ablösen; Samen häufig geflügelt. Die Bignoniaceae sind allermeist Holzgewächse der wärmeren Länder, vorzugsweise tropisch; zu den am meisten charakteristischen Formen gehören starke Lianen von unregelmäßigem Holzbau, die durch Ranken an den Blattenden klettern.

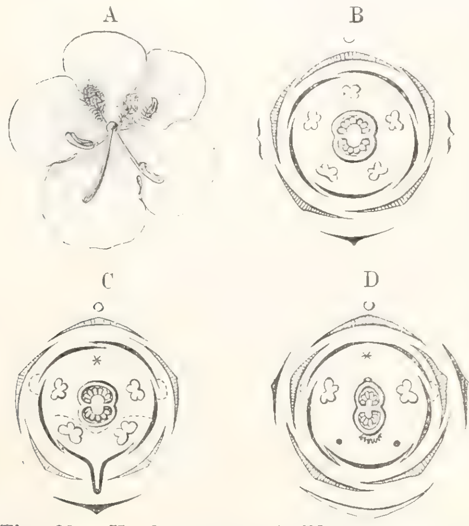


Fig. 82. Verbascum. A Blüte von oben. B Diagramm. C Diagramm von Linaria vulgaris. D Diagramm von Gratiola officinalis. Nach Eichler.

Die Gruppe der Bignonieae ist mit zahlreichen Gattungen besonders in Brasilien entwickelt, Arrabideae usw.; Catalpa, baumförmig, in Amerika und Ostasien heimisch, viel kultiviert; Tecoma, 80 Arten in Amerika, besonders Brasilien, Bäume oder Sträucher mit gefingerten Blättern; Crescentia cujete, Kalebassen-Baum in Amerika; Kigelia africana, starker Baum in Afrika mit eigentümlichen lang zylindrischen Früchten (die Crescentieen sind durch nicht aufspringende Früchte in der Familie ausgezeichnet).

Pedaliaceae. Im Blütenbau mit den Scrophulariaceen nahe verwandt, aber besonders durch die Frucht unterschieden; diese ist nußartig, nicht aufspringend, oder eine Kapsel, auf mannigfache Art mit Flügelleisten oder starken Stacheln oder Widerhaken besetzt oder kantig, im Fach mit einem bis vielen Samen; anatomisch ist die Familie durch Schleimdrüsenhaare ausgezeichnet.

Sesamum indicum, viel in der alten Welt gebaut, liefert in den Samen Oel (Sesamöl).

Orobanchaceae. Die Orobanchaceae sind besonders durch den einfächerigen Fruchtknoten ausgezeichnet, der von zwei Carpellen gebildet wird; die Samenanlagen stehen zahlreich an den getrennten oder in der Mitte des Faches vereinten Plazenten; die Blumenkrone ist zweilippig; Staubblätter vier; die Frucht ist eine fachspaltige Kapsel. Die Orobanchaceae sind parasitische Kräuter mit Schuppenblättern, ihre Blüten stehen in Aehren oder Trauben; sie sind besonders in den gemäßigten Ländern der nördlichen Hemisphäre entwickelt.

Orobanche, Orobanche ramosa, besonders auf Hanf und Tabak, Orobanche minor auf Klee; zahlreiche Arten auf anderen Nährpflanzen; Lathraea squamaria, Schuppenwurz in Europa und Asien.

Gesneraceae. Die Gesneraceae schließen sich im Blütenbau nahe an die vorigen Familien an; der Fruchtknoten ist oberständig oder unterständig, einfächerig, mit wandständigen Plazenten mit vielen Samenanlagen; die häufig großen und schön gefärbten Blüten sind ausgeprägt zygomorph, mit zweilippiger Krone und vier oder zwei Staubblättern. Die artenreiche Familie ist ausschließlich tropisch; die Gesneraceae sind vielfach durch weiche sammetige Behaarung aller Teile charakterisiert; in der Kultur werden sie oft durch Blattstecklinge vermehrt.

In Europa nur zwei Gattungen, Ramondia mit vier Arten in den südeuropäischen Gebirgen, Haberlea mit einer Art im Balkan; Sinningia speciosa, Gloxinie, aus Brasilien stammend, beliebte Zierpflanze.

Lentibulariaceae. Die Blumenkrone ist zweilippig, die Unterlippe gespornt oder ausgesackt; Staubblätter zwei, an der Basis der Blumenkrone angeheftet; der Fruchtknoten ist einfächerig mit freier zentraler Plazenta mit vielen Samenanlagen.

Pinguicula, an feuchten Standorten, besonders in Gebirgen, Utricularia, Sumpf- und Wasserformen, zierliche Gewächse mit ganzrandigen oder feingeteilten Blättern mit insektenfangenden Schläuchen; 200 Arten, vorzugsweise tropisch.

Globulariaceae. Die Familie ist besonders ausgezeichnet durch den einfächerigen Fruchtknoten mit einer hängenden Samenanlage; die Frucht ist ein einsamiges Nüßchen. Die Globulariaceae sind andauernde niedrige Gewächse mit abwechselnden Blättern und in Köpfchen oder Aehren stehenden Blüten.

Am nächsten sind wohl die Beziehungen zu den Scrophulariaceen (Selagineae). Globularia, mediterran und alpin, Kugelblume.

Acanthaceae. Die Blumenkrone ist langröhrig mit zweilippigem Saum; Staubblätter vier oder zwei; der Fruchtknoten ist zweifächerig mit je zwei bis vielen Samenanlagen an der Scheidewand; charakteristisch

ist die bis zum Grunde loculicid aufspringende Kapsel, jede Hälfte der Kapsel trägt die halbe Scheidewand mit einer der beiden Reihen der Samen; außerordentlich mannigfaltig ist der Pollen, dessen verschiedene Form und Oberflächenskulptur ein gutes Einteilungsprinzip der Familie ergibt. Die Acanthaceae, eine artenreiche Familie (über 2000 Arten), sind fast ausschließlich tropisch, besonders Kräuter und Sträucher des Urwaldes, von charakteristischem Habitus, mit gegenständigen Blättern und ährigen oder traubigen Blütenständen.

Bis ins Mittelmeergebiet dringt die Gattung Acanthus vor (Acanthus mollis, Acanthus spinosus); die Blätter lieferten bedeutsame Motive für Skulpturen (Säulenkapitäle in Griechenland usw.); artenreiche Gattungen Thunbergia (in der alten Welt), Justitia (tropisch).

Myoporaceae. Eine besonders in Australien entwickelte kleine Familie, die zu den Scrophulariaceen Beziehungen zeigt; der Unterschied liegt besonders in der Frucht, die bei den Myoporaceae eine Steinfrucht mit meist einem Steinkern ist, der infolge falscher Scheidewandbildung vierfächerig ist, mit je einem Samen im Fach. Die Myoporaceae sind Sträucher oder kleine Bäume mit schmalen Blättern mit einzeln oder gebüschelt stehenden Blüten.

7. Reihe Plantaginales. Die Reihe wird nur von der Familie der Plantaginaceae gebildet; sie zeigt deutliche Beziehungen zu den Tubifloren, doch ist die Stellung des Kelches diagonal zum Deckblatt; die Blüten sind viergliederig bis auf den aus zwei Carpellen gebildeten Fruchtknoten, und strahlig; die Frucht ist eine sich rings mit einem Deckel öffnende Kapsel.

Plantaginaceae. Die Blüten stehen in Aehren in den Achseln breiter Deckblätter; die Blumenkrone ist trockenhäutig; der Fruchtknoten enthält zwei bis viele Samenanlagen.

Plantago, Blätter meist spiralig, häufig in Rosetten, nur in der Sektion Psyllium dekussiert; meist krautig, seltener Halbsträucher; über 200 Arten in allen Weltteilen; Litorella lacustris, mit eingeschlechtlichen Blüten, Wasserpflanze in Nord- und Mitteleuropa.

8. Reihe Rubiales. Der Fortschritt in dieser Reihe ist durch den stets unterständigen Fruchtknoten gegeben; die Blüten sind strahlig oder seltener zygomorph, mit gleichzähligem oder minderzähligem Androeceum.

Rubiaceae. Die Blüten der Rubiaceae sind meist strahlig, vier- bis fünfgliederig, die Blumenkrone mit mehr oder weniger langer Röhre; Carpelle meist zwei, mit je einer bis vielen umgewendeten Samenanlagen; die Halbfrucht (Vereinigung von Carpellen und Blütenachse) ist eine Kapsel oder Beere. Die außerordentlich artenreiche Familie (500 Arten) ist vorzugsweise tropisch; die Arten sind krautig oder holzig, vielfach in den Tropen wichtige Komponenten des Urwaldes; die Blätter stehen dekussiert und haben stets Nebenblätter, die interpetiolar oder intrapetiolar sind; die Blüten stehen meist in Rispen.

In der Unterfamilie der Cinchonoideae haben die Carpelle zahlreiche Samenanlagen. Die wichtigste Gattung ist Cinchona, deren Rinde (Cortex Chinae) Chinin liefert; mehrere Arten leben am Ostabhang der Anden zwischen 1600 und 2400 m; in neuerer Zeit werden Arten (Cinchona succirubra) im tropischen Asien kultiviert. In der Unterfamilie der Coffeoideae hat jedes Carpell nur eine Samenanlage; Coffea, die Frucht ist eine dunkelgefärbte Steinfrucht mit fleischigem Exokarp und zwei Samen, Coffea arabica ist ein Strauch oder kleiner Baum, der in gebirgigen Gegenden in Ostafrika heimisch ist (besonders Abyssinien); eine zweite Art ist Coffea liberica, ein kleiner Baum, der in Westafrika heimisch ist; Uragoga ipecacuanha, eine krautige Pflanze im westlichen Brasilien, liefert Radix Ipecacuanha; Myrmecodia-Arten sind als typisch myrmecophil bekannt, in Ostasien heimisch; die Grundachse ist knollig verdickt und von Gängen durchzogen, in denen Ameisen leben; durch stärkere Vergrößerung der Nebenblätter, die den Laubblättern dann gleichen, entstehen

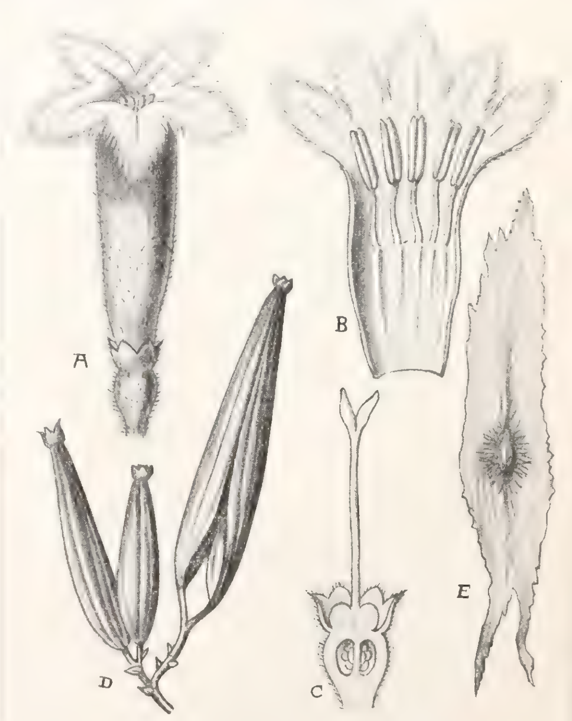


Fig. 83. Cinchona succirubra. Vergrößerte A Blüte; B Blumenkrone aufgeschnitten; C Fruchtknoten und Kelch im Läng schnitt; D Früchte. Natürliche Größe; E Samen.

Wirtel von Blättern bei den Galieae, Rubia (Rubia tinctorum, Krapp, in Südeuropa heimisch), Galium, Asperula (Waldmeister).

Caprifoliaceae. Die Familie der Caprifoliaceae schließt sich im Blütenbau eng an die vorige an; die Blüten sind strahlig oder zygomorph; meist sind drei Carpelle vorhanden, mit einer bis vielen Samenanlagen; die Frucht ist meist beerenartig. Die Caprifoliaceae sind Holzgewächse der nördlichen gemäßigten Zonen.

Gattungen mit einer Samenanlage im Fach: Sambucus, Holunder, Sambucus nigra durch Europa verbreitet; Viburnum, Steinfrucht durch Abort mit einem Stein; Viburuum opulus, Schneeball. Gattungen mit mehreren Samenanlagen im Fach: Lonicera, Frucht eine wenigsamige Beere, Lonicera caprifolium, Geißblatt; Symphoricarpus, Schneebeere, in Nordamerika; Linnaea borealis, Halbsträuchlein mit glockigen Blüten im kälteren Europa, Asien und Nordamerika.

Adoxaceae. Die Familie ist auf die einzige Art Adoxa moschatellina aufgestellt worden, deren Verwandtschaftsbeziehungen sehr verschieden aufgefaßt wurden; sie wurde auch zu den Saxifragaceen in Beziehungen gebracht. Der Kelch ist abortiert, Tragblatt und Vorblätter bilden verwachsen einen Scheinkelch; Blütenblätter vier bis sechs, ebensoviel Staubblätter, die aber bis zum Grunde gespalten sind; Fächer des halbunterständigen Fruchtknotens mit je einer hängenden Samenanlage; Steinfrucht. Die Art ist krautig, mit einem Rhizom perennierend; der blühende Stengel hat zwei Laubblätter und einen endständigen Blütenknäuel; verbreitet in den gemäßigten Gebieten Europas, Asiens und Nordamerikas.

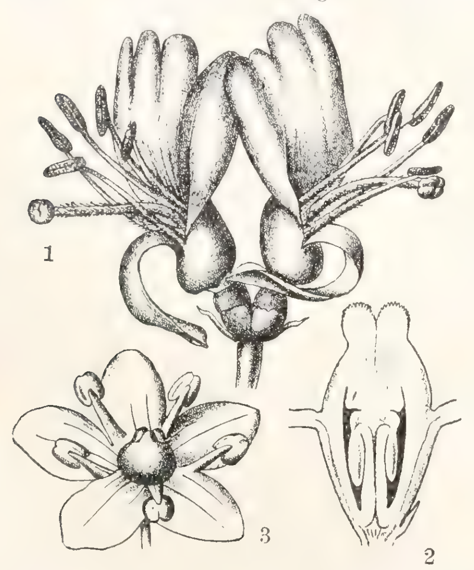


Fig. 84. 1 Infloreszenz von Lonicera nigra. 2 Sambucus nigra; Fruchtknoten längs durchschnitten. 3 Blüte von Sambucus nigra. Nach Wettstein.

Valerianaceae. Der Kelch ist zur Blütezeit nur schwach entwickelt, später bildet er sich häufig zur Haarkrone aus; Staubblätter in geringerer Anzahl als Blumenkronenzipfel, eines bis vier; Fruchtknoten mit nur einem fertilen Fach mit einer Samenanlage.

Die Valerianaceae sind krautartige Gewächse mit opponierten Blättern, ohne Nebenblätter; sie sind in der nördlichen Hemisphäre und besonders reich in den Anden entwickelt. Valerianella, Valerianella olitoria, Rapunzelchen; Valeriana, Baldrian, die Wurzeln sind durch den Gehalt an ätherischem Oel und starken Geruch ausgezeichnet, Valeriana officinalis in Asien und Europa.

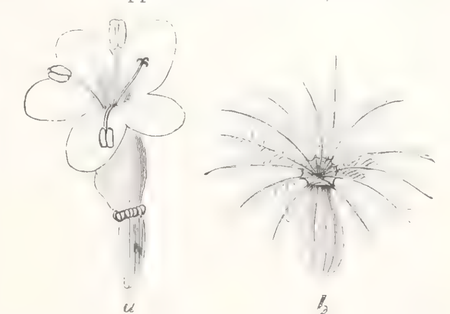


Fig. 85. Valeriana officinalis. a Blüte, b Frucht.

Dipsacaceae. Im Blütenbau stimmen die Dipsacaceae mit den Valerianaceen nahe überein; sie sind durch einen aus Vorblättern gebildeten Außenkelch charakterisiert, der die Blüten umgibt; der Fruchtknoten ist einfächerig mit einer hängenden Samenanlage. Die Dipsacaceae sind krautig oder halbstrauchig, mit gegenständigen Blättern und meist köpfchenartigen, reichblütigen Blütenständen; sie sind besonders im Mittelmeergebiet entwickelt.

Succisa pratensis, in ganz Europa, Knautia; Scabiosa; Dipsacus, Dipsacus fullonum, Weberkarde in Südwesteuropa.

9. Reihe Cucurbitales. Wie in der vorigen Reihe haben die Blüten einen unterständigen Fruchtknoten; sie sind typisch fünfgliederig; das Androeceum ist in mannigfacher Weise ausgebildet; nur ganz selten sind fünf freie Staubblätter vorhanden, meist ist nur ein Staubblatt frei und die vier anderen sind zu zwei Paaren verwachsen, oder die Verwachsung geht noch weiter bis zur Vereinigung aller Antheren und Verschmelzung der Staubfäden in eine Säule. Die Reihe enthält nur die Familie der Cucurbitaceen, deren Platz unter den Sympetalen zweifelhaft ist; will man sie unter diesen belassen, so sind sie in die Nähe der Campanulaten zu stellen, doch lassen sich auch Beziehungen zu den Passifloraceen und Loasaceen nicht verkennen.

Cucurbitaceae. Die Blüten der Cucurbitaceae sind stets eingeschlechtlich; der untere Teil der Blütenhülle ist von Kelch und Blumenkrone gemeinsam gebildet; der unterständige Fruchtknoten ist meist dreifächerig mit zentralwinkelständigen Plazenten mit vielen Samenanlagen; die Frucht ist gewöhnlich beerenartig. Die Cucurbitaceae sind krautige, raschwachsende Pflanzen, die mit Hilfe von Ranken klettern, die metamorphosierte Nebenblätter oder Sprosse sind. Die Cucurbitaceae sind weit über die Erde verbreitet, vorzugsweise aber in den Tropen entwickelt, in kältere Klimate gehen sie nicht über.

Acanthosicyos horrida, die Narraspflanze, eine dornige Dünenpflanze Südwest-

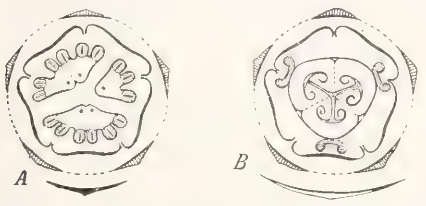


Fig. 86. Ecballium (Cucurbitacae). Diagramm. A Männlich, B weiblich. Nach Eichler.

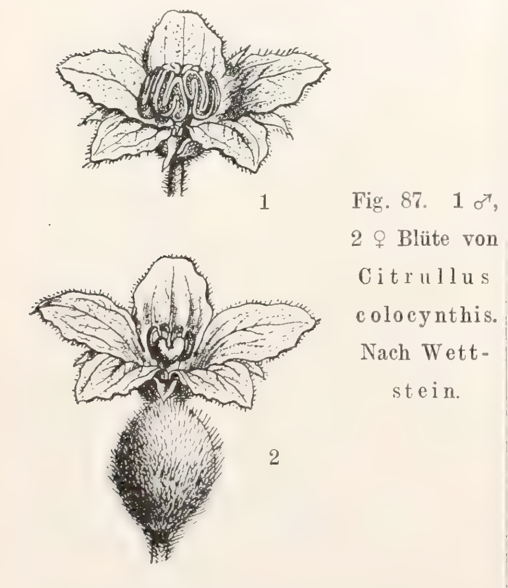


Fig. 87. 1 ♂, 2 ♀ Blüte von Citrullus colocynthis. Nach Wettstein.

afrikas mit riesigen Wurzeln, deren runde Früchte den Hottentotten zur Nahrung dienen; Luffa cylindrica, in den Tropen der Alten Welt, das Fasernetz der Frucht liefert Luffa-Schwämme; Bryonia, Zaunrübe, die am weitesten nördlich gehende Cucurbitacee, Citrullus vulgaris, Wassermelone, im südlichen Afrika heimisch, Citrullus colocynthis, Koloquinthe, in der Alten Welt verbreitet; Cucumis melo, Melone, Cucumis sativus Gurke, Lagenaria vulgaris, Flaschenkürbis, Kalebasse; Cucurbita pepo, Kürbis.

10. Reihe Campanulatae. Mit der vorigen verwandt; die Antheren mit zwei Fächern, zusammenneigend und häufig teil-

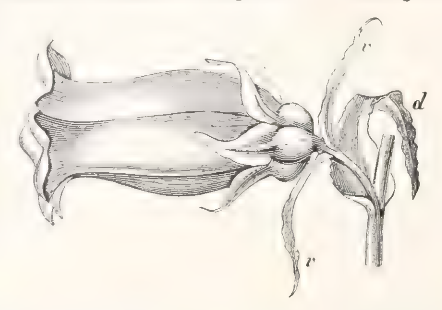


Fig. 88. Campanula medium. Blüte mit Deckblatt (d) und 2 Vorblättern (v), Fruchtknoten unterständig.

weise oder sämtlich vereint; Fruchtknoten unterständig mit vielen bis einer Samenanlage in den Fächern oder einfächerig mit einer Samenanlage.

Campanulaceae. Die Blüten sind meist fünfgliederig, strahlig oder zygomorph; Kelchblätter frei; Staubblätter frei oder verwachsen; Fruchtknoten gefächert mit zentralwinkelständigen Plazenten, meist mit vielen Samenanlagen; die Frucht ist eine Kapsel. Die Campanulaceen sind krautige Gewächse mit abwechselnden Blättern und meist ansehnlichen Blüten; sie sind über die Erde verbreitet, besonders in gemäßigten Klimaten entwickelt (vgl. den Artikel „Bestäubung").

In der Unterfamilie der Campanuloideae sind die Blüten strahlig oder nur schwach zygomorph; Campanula, 250 Arten, besonders mediterran, Phyteuma, besonders alpin und mediterran; Jasione. In der Unterfamilie der Lobelioideae sind die Blüten stark zygomorph, die Staubblätter verwachsen; Siphocampylus, artenreich im tropischen Südamerika; Lobelia, die Blumenkrone ist bis zum Grunde geschlitzt, 200 Arten in wärmeren Ländern, Lobelia erinus in Südafrika.

Goodeniaceae. Die Familie ist fast ganz auf Australien beschränkt; die Arten sind krautig oder Halbsträucher. Im Blütenbau schließen sich die Goodeniaceae eng an die Campanulaceen an, mit denen sie auch von Autoren vereinigt werden. Sie sind durch den „Pollenbecher" ein napfförmiges Gebilde dicht unterhalb der Narbe ausgezeichnet.

Stylidiaceae. Die Stylidiaceae sind wie die vorige Familie fast ausschließlich australisch; es sind krautige Gewächse mit meist schmalen, grasartigen Blättern; die zygomorphe Blüte entwickelt nur zwei Staubblätter, die mit dem Griffel verwachsen sind („Columna"); die Antheren sind extrors; der Fruchtknoten ist zweifächerig, mit den Samenanlagen an der Scheidewand, oder durch unvollständige Ausbildung

der Scheidewand einfächerig mit zentraler Plazenta. Den ursprünglichsten Typus stellt die antarktische Gattung Donatia mit freien Petalen dar. Stylidium, 100 Arten.

Compositae. Die Blüten der Compositae stehen in Köpfchen („Korbblütler") auf einem gemeinsamen Blütenboden, der häufig Spreublätter trägt; die Köpfchen sind von einer Hülle von Hochblättern umgeben, wodurch sie das Ansehen von Einzelblüten gewinnen; die Blüten eines Köpfchens sind entweder alle gleich und fruchtbar, oder in Randblüten (Zungenblüten, meist weiblich oder ungeschlechtlich, zygomorph) und Scheibenblüten (meist zweigeschlechtlich, strahlig oder schwächer zygomorph) geschieden; der Kelch fehlt oder wird durch einen Pappus aus Borsten oder Schuppen ersetzt, der an der Frucht stehen bleibt und häufig stark vergrößert als Verbreitungsmittel dient; Antheren der Staubblätter in eine Röhre verwachsen, Staubfäden meist frei; der Griffel trägt Fegehaare und entwickelt sich später als die Staubblätter; bei seiner Streckung fegt er den Pollen aus der Staubblattröhre heraus, erst dann werden die Griffelschenkel entfaltet; der unterständige Fruchtknoten ist stets einfächerig, mit einer Samenanlage, die Frucht ist eine Schließfrucht. Die Compositae sind krautige oder strauchige, selten baumförmige Gewächse von verschiedenstem Habitus; sie sind nächst den Orchideen die artenreichste Familie der Phanerogamen und über die ganze Erde verbreitet. Folgende Gruppen sind zu unterscheiden:

A. Vernonieae. Köpfchen homogam (alle Blüten eines Köpfchens zweigeschlechtlich und fruchtbar); Blüten nie gelb; Antheren am Grunde spitz; Griffelschenkel spitz zulaufend, außen mit Fegehaaren. Meist tropisch, unter ihnen viele Xerophyten der Steppen, am artenreichsten Vernonia.

B. Eupatorieae. Im Blütenbau der vorigen Gruppe ähnlich, aber Antheren am Grunde stumpf und Griffelschenkel stumpf oder nach oben keulig verdickt, nur nach oben zu außen mit Fegehaaren besetzt. Eupatorium, artenreiche Gattung in Amerika, Adenostyles, in Gebirgen Europas; Ageratum conyzoides, Zierpflanze.

C. Astereae. Köpfchen homogam oder heterogam (d. h. Randblüten weiblich oder ungeschlechtlich, Scheibenblüten zweigeschlechtlich oder männlich); Korollen der Scheibenblüten oder aller Blüten strahlig; Antheren am Grunde stumpf. Narben an den ziemlich flachen Griffelschenkeln deutlich randständig, oberhalb der Narben ein Anhängsel mit Fegehaaren. Besonders in gemäßigten Klimaten verbreitet; Solidago; Bellis; Aster, viele in Gebirgen; Baccharis, über 300 Arten in Amerika, charakteristische Pflanzen tropischer Steppen.

D. Inuleae. Köpfchen homogam oder heterogam; Korolle aller Blüten oder der Scheibenblüten strahlig; Antheren am Grunde geschwänzt; Griffel verschieden. Filago, Gnaphalium, wollig oder filzig, artenreich; Helichrysum, besonders in Südafrika, Leontopodium alpinum, Edelweiß, in Gebirgen in Europa und Asien; Inula, altweltlich, Inula helenium, Alant (Radix Helenii).

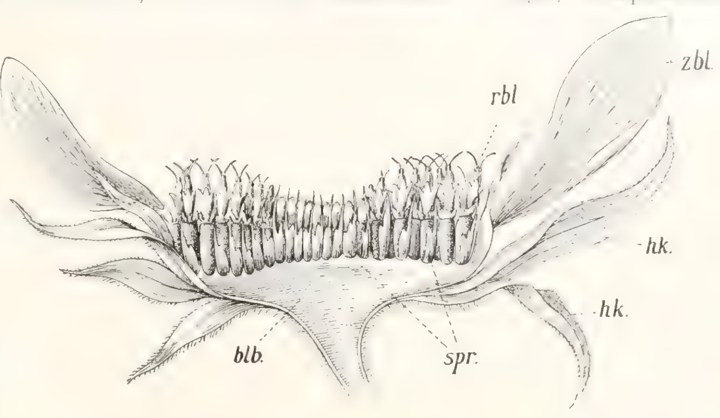


Fig. 89. Längsschnitt durch das Köpfchen einer Composite. blb Blütenboden; spr Spreublätter; hk Hüllkelch; zbl Zungenblüte; rbl Röhrenblüten. Nach Engler-Prantl.

E. Heliantheae. Blumenkrone der Scheibenblüten strahlig; Griffelschenkel oberhalb der Teilungsstelle mit einem Kranz von längeren Fegehaaren; Blütenboden mit Spreublättern. Besonders in Amerika heimisch; Zinnia, Rudbeckia, Zierpflanzen aus Nordamerika, Xanthium spinosum, mit stacheligen Hüllblättern.

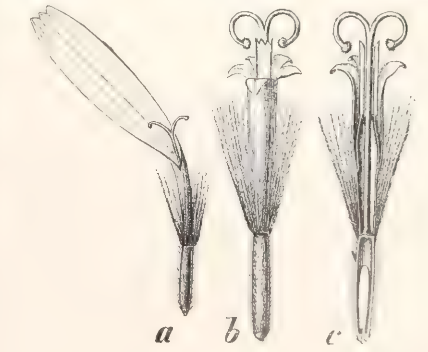


Fig. 90. Arnica montana. a Randblüte; b Scheibenblüte; c Dieselbe im Längsschnitt. Nach Berg und Schmidt.

lästiges Unkraut; Helianthus annuus, Sonnenblume, wahrscheinlich aus Mexiko, Helianthus tuberosus, Topinambur, mit eßbaren Knollen, aus Nordamerika; Dahlia variabilis, Georgine, Zierpflanze aus Mexiko; Galinsoga parviflora, aus Amerika, über die Erde verschlepptes Unkraut.

F. Helenieae. Wie die vorige Gruppe, aber keine Spreublätter vorhanden. In Amerika heimisch; Helenium; Tagetes; Pectis, besonders im tropischen Amerika.

G. Anthemideae. Griffel wie in den vorigen beiden Gruppen; Hüllblätter am Rande und an der Spitze mit trockenhäutigem Saum; Pappus nicht ausgebildet oder verkümmert. Die Gruppe ist besonders im Mittelmeergebiet und in Südafrika entwickelt. Anthemis, in Europa, Westasien und Nordafrika, Anthemis nobilis (Westeuropa) liefert Flores Chamomillae Romanae; Achillea millefolium, Schafgarbe; Matricaria Chamomilla (Flores Chamomillae); Chrysanthemum, weit verbreitet, Chrysanthemum indicum und Chrysanthemum sinense, in China und Japan heimisch, berühmte Zierpflanzen, in zahllosen Spielarten gezogen, Chrysanthemum cinerariifolium, Dalmatien (Dalmatinisches Insektenpulver), Chrysanthemum roseum, Kaukasus, Nordpersien (Persisches Insektenpulver); Artemisia vulgaris, Beifuß, Artemisia dracunculus, Estragon, in Rußland heimisch, Artemisia absinthium, zur Absynthbereitung, in Mittel- und Südeuropa.

H. Senecioneae. Griffel wie bei vorigen; Pappus haarförmig. Senecio, artenreiche Gattung, über die Erde verbreitet, baumförmige Arten im tropischen Afrika Senecio Johnstoni am Kilimandscharo; Tussilago farfera, Huflattich, in Europa und Asien, Arnica montana, auf Bergwiesen Mitteleuropas (Tinctura Arnicae).

I. Calenduleae. Köpfchen mit weiblichen Randblüten und meist unfruchtbaren, strahligen Scheibenblüten mit ungeteiltem Griffel; Antheren am Grunde zugespitzt; Blütenboden ohne Spreuschuppen; Pappus nicht entwickelt. Meist in Südafrika; Calendula, im Mittelmeergebiet, Calendula officinalis, Ringelblume, beliebte Zierpflanze.

K. Arctotideae. Köpfchen mit zungenförmigen, weiblichen oder sterilen Randblüten; Griffel unter oder an der Teilungsstelle verdickt oder mit einem Kranz längerer Fegehaare. Besonders in Südafrika; Ursinia, Arctotis.

L. Cynareae. Griffel wie in voriger Gruppe; Köpfchen homogam oder mit ungeschlechtlichen (selten weiblichen), nicht zungenförmigen Randblüten; Blütenboden meist borstig. Besonders im Mittelmeergebiet verbreitet. Echinops sphaerocephalus, die Köpfchen sind einblütig und zu großen kugeligen Köpfchen zweiter Ordnung vereinigt; Carduus, Cirsium, Disteln, besonders mediterran; Cynara scolymus, Artischocke, mit eßbaren Hüllblättern und Blütenboden, mediterran; Centaurea, gegen 500 Arten, Centaurea cyanus, Kornblume, Ackerunkraut; Carthamus tinctoreus, Saflor, mediterran.

M. Mutisieae. Köpfchen homogam oder heterogam, Randblüten zweilippig, Scheibenblüten ebenso oder strahlig. Mit den charakteristischen Gattungen besonders in Südamerika entwickelt, so Mutisia, deren Arten kletternde oder aufrechte Sträucher mit großen Blütenköpfchen sind; die Mittelrippe des Blattes geht in eine Ranke aus.

N. Cichorieae. Korolle aller Blüten im Köpfchen zungenförmig; Pflanzen mit Milchsaftschläuchen; Cichorium intybus, in Europa und Asien, die Wurzeln liefern das Kaffeesurrogat der Cichorie, Cichorium endivia, mediterran, Endiviensalat; Taraxacum officinale, Löwenzahn; Scorzonera; Sonchus; Lactuca sativa, Salat, vielleicht nur Kulturform der in Europa und Asien verbreiteten Lactuca scariola; Hieracium, zahlreiche Arten besonders in Europa, vielfach nur durch geringe Unterschiede getrennt, aber durch ihre parthenogenetische Fortpflanzungsart sich konstant erhaltend.

Literatur. *A. Allgemeine Werke: 1.* ***A. Engler,*** *Syllabus der Pflanzenfamilien. 6. Aufl. Berlin 1909. — 2.* ***A. Engler*** *und* ***K. Prantl,*** *Die natürlichen Pflanzenfamilien. Leipzig. Seit 1887. Durch neue Nachträge ergänzt. — 3.* ***A. Engler,*** *Das Pflanzenreich. Regni vegetabilis conspectus. Leipzig. Erscheint in einzelnen Monographien seit 1900. — 4.* ***R. v. Wettstein,*** *Handbuch der systematischen Botanik II. Leipzig und Wien 1903 bis 1908. — 5.* ***G. Bentham and J. D. Hooker,*** *Genera Plantarum, 3 Bde. London 1862 bis 1883. — 6.* ***H. Baillon,*** *Histoire des Plantes, 13 Bände. Paris 1867 bis 1897. — B. Arbeiten, die sich auf einzelne Familien beziehen, in der Reihenfolge des Systems. Es werden nur neuere wichtige Monographien angegeben; für die gesamte ältere Literatur muß auf die Verzeichnisse in den Bearbeitungen der „Natürlichen Pflanzenfamilien" verwiesen werden. Pandanaceae:* ***O. Warburg,*** *P. in Engler, Pflanzenreich, IV. 9 (1900). — Typhaceae:* ***P. Gräbner,*** *Ty. l. c. IV. 8 (1900). — Sparganiaceae:* ***Derselbe,*** *S. l. c. IV. 10 (1900). — Potamogetonaceae:* ***P. Ascherson und P. Gräbner,*** *P. l. c. IV. 11 (1907). — Najadaceae:* ***A. B. Rendle,*** *N. l. c. IV. 12 (1901). — Scheuchzeriaceae, Alismataceae, Butomaceae:* ***Fr. Buchenau,*** *Sch., A., B. l. c. IV. 14, 15, 16 (1903). — Triuridaceae:* ***A. Malme,*** *Ueber Triuris lutea (Gardn). —* ***Bentham and Hooker*** *in Bih. Sv. Vet. Akad. Handl. XXI. III. (1897). — Gramineae:* ***J. Schuster,*** *Ueber die Morphologie der Grasblüte. Flora 100, Heft 2. — Cyperaceae: Monographie der Gattung Carex von* ***G. Kükenthal*** *in Engler, Pflanzenreich IV. 20 (1909). — Palmae:* ***J. Barbosa Rodriguez,*** *Sertum Palmarum Brasiliensium. Brüssel 1903. t. 1—174. — Araceae:* ***A. Engler,*** *A. Pothoideae in Pflanzenreich IV. 23 B (1905); ebenso* ***A. Engler und K. Krause,*** *A. Monsteroideae und A. Calloideae. — Xyridaceae:* ***A. Malme,*** *verschiedene Arbeiten in Bih. Sv. Vet. Akad. Handl. — Eriocaulonaceae:* ***W. Ruhland,*** *E. in Engler, Pflanzenreich IV. 30 (1903). — Juncaceae:* ***Fr. Buchenau,*** *J. l. c. IV. 36 (1906). — Liliaceae:* ***W. Trelease,*** *The Yucceae in Rep. Missouri Bot. Garden 13 (1902). — Taccaceae:* ***W. Limpricht,*** *Beitrag zur Kenntnis der T. Breslau 1902. — Musaceae:* ***K.***

Schumann, *M. in Engler, Pflanzenreich IV. 45 (1900). — Zingiberaceae:* **Derselbe,** *Z. in Engler, Pflanzenreich IV. 46 (1904). — Marantaceae:* **Derselbe,** *M. l. c. IV. 48 (1902). — Burmanniaceae:* **I. Urban,** *B. in Symb. Antill. III (1903) 430. — Corsiaceae, Apostasiaceae:* **R. Schlechter** *in K. Schumann und Lauterbach, Nachtr. Fl. Deutsch. Schutzgeb. Südsee (1905). — Orchidaceae:* **Derselbe,** *l. c. und zahlreiche andere Arbeiten. —* **A. Cogniaux,** *O. in Flora Brasil. III. Pars IV—VI. —* **E. Pfitzer,** *O. Pleonandrae in Engler, Pflanzenreich IV. 50 (1903). —* **E. Pfitzer und Fr. Kränzlin,** *O. Monandrae-Coelogyninae l. c. IV. 50 II. B. 7 (1907). —* **Fr. Kränzlin,** *O. Monandrae Dendrobiinae, l. c. IV. 50. II. B. 21 (1910). — Casuarinaceae:* **O. Porsch,** *Der Spaltöffnungsapparat von Casuarina und seine phyletische Bedeutung, Oest. Bot. Ztschr. 54 (1904) 1. — Salicaceae:* **A. et G. E. Camus,** *in Journ. de Bot. 18 (1904). —* **O. v. Seemen,** *S. Japonicae, Leipzig 1903. — Myricaceae:* **A. Chevalier,** *Monographie des M. in Mem. Soc. Sc. Nat. Cherbourg 32 (1901) 85—322. — Betulaceae:* **H. Winkler,** *B. in Engler, Pflanzenreich IV. 51 (1904). — Rafflesiaceae:* **H. Graf zu Solms-Laubach,** *R. l. c. IV. 75 (1901). — Phytolaccaceae:* **H. Walter,** *Ph. l. c. IV. 83 (1909). — Berberidaceae:* **G. Tischler,** *Die B. und Podophyllaceen, in Englers Bot. Jahrb. 31 (1902) 596—727. —* **F. Fedde,** *Versuch einer Monogr. der Gattung Mahonia l. c. 31 (1901) 30 bis 133. — Menispermaceae:* **L. Diels,** *M. in Engler, Pflanzenreich IV. 94 (1910). — Myristicaceae:* **O. Warburg,** *Monographie der M. in Nov. Act. Acad. Leop. Carol. 68. — Monimiaceae:* **J. Perkins und E. Gilg,** *M. in Engler, Pflanzenreich IV. 101 (1901). — Papaveraceae:* **F. Fedde,** *P. Hypecoideae und P. Papaveroideae l. c. IV. 104 (1909). — Cruciferae:* **A. von Hayek,** *Entwurf eines Cruciferensystems auf phylogenetischer Grundlage, in Beih. Bot. Zentralbl. XXVII (1911) Abt. I. —* **A. Thellung,** *Die Gattung Lepidium, in N. Denkschr. Schweiz. Naturf. Ges. 41 (1907) 1—340. — Sarraceniaceae, Nepenthaceae:* **J. M. Macfarlane,** *S. und N. in Engler, Pflanzenreich IV. 110, 111 (1908). — Droseraceae:* **L. Diels,** *D. l. c. IV. 112 (1906). — Connaraceae:* **Schellenberg,** *Beitr. Vergl. Anat. und Syst. Connaraceae. Diss. Zürich 1911. — Geraniaceae:* **R. Knuth,** *in Englers Bot. Jahrb. 32 (1902) 190. — Tropaeolaceae:* **F. Buchenau,** *T. in Engler, Pflanzenreich IV. 131 (1902). — Erythroxylaceae:* **O. E. Schulz,** *E. l. c. IV. 134 (1907). — Malpighiaceae: Bearbeitung einzelner Gattungen durch* **F. Niedenzu,** *in Ind. Lect. Lyc. Hos. seit 1897. — Euphorbiaceae:* **F. Pax,** *E. Jatropheae in Engler, Pflanzenreich IV. 147 (1910), E.-Adrianeae l. c. IV. 147. II (1910). — Aquifoliaceae:* **Th. Lösener,** *Monographia A. I., in Nov. Act. Ac. Leop. Carol. 78 (1901). — Aceraceae:* **F. Pax,** *A. in Engler, Pflanzenreich IV. 163 (1902). — Cistaceae:* **Grosser,** *C. l. c. IV. 193 (1903). — Violaceae:* **W. Becker,** *Violaceae Europapae, Dresden 1910, und zahlreiche Einzelarbeiten. — Lythraceae:* **E. Köhne,** *L. in Engler, Pflanzenreich IV. 216. — Halorrhagaceae:* **A. K. Schindler,** *H. l. c. IV. 225 (1905). — Cornaceae:* **W. Wangerin,** *C. l. c. IV. 229 (1910). — Primulaceae:* **F. Pax und R. Knuth,** *P. l. c. IV. 237 (1905). — Myrsinaceae, Theophrastaceae:* **C. Mez,** *M. u. Th. l. c. IV. 236, 236a (1902). — Sapotaceae:* **A. Engler,** *S. in Monogr. Afrik. Pflanzenf. VIII (1900). — Styracaceae:* **J. R. Perkins,** *St. in Engler, Pflanzenreich IV. 241 (1907). — Symplocaceae:* **A. Brand,** *S. l. c. IV. 242 (1901). — Apocynaceae:* **Stapf,** *A. in Flora Trop. Afr. IV. 1 (1902). — Asclepiadaceae:* **A. Malme,** *Die A. des Regnellschen Herbars in K. Sv. Vet. Akad. Handl. 34 Nr. 7 (1900). — Convolvulaceae:* **H. Hallier,** *Zahlreiche Einzelarbeiten in Englers Bot. Jahrb., Bull. Herb. Boissier, etc. —* **A. B. Rendle,** *C. in Fl. Trop. Afr. IV. 2 (1906). — Polemoniaceae:* **A. Brand,** *P. in Engler, Pflanzenreich IV. 250 (1907). — Caprifoliaceae:* **A. Rehder,** *Synopsis of the Genus Lonicera, Rep. Missouri. Bot. Garden XIV. — Adoxaceae:* **W. Sturm,** *Viertelj. Schr. Naturf. Ges. Zürich 54 (1910). — Campanulaceae:* **Johanna Witasek,** *Ein Beitrag zur Kenntnis der Gattung Campanula, in Abh. K. K. Zool. Bot. Ges. Wien (1902). —* **R. Schulz,** *Monographie der Gattung Phyteuma (1904). — Stylidiaceae:* **J. Mildbraed,** *St. in Engler, Pflanzenreich IV. 278 (1908).*

R. Pilger.

Ångström

Anders Jonas.

Geboren am 13. August 1814 in Lödgö in Schweden; gestorben am 21. Juni 1874. Er studierte seit 1833 in Upsala Mathematik und Physik, habilitierte sich daselbst 1839 für Physik, wurde 1843 Observator der Astronomie, 1858 Professor der Physik, 1867 Sekretär der Königl. Societät der Wissenschaften in Upsala. Er ist namentlich durch seine Arbeiten über die Spektralanalyse und das Sonnenspektrum und durch seinen 1868 erschienenen Atlas des Sonnenspektrums bekannt, indem die Fraunhoferschen Linien zum erstenmal nach ihren Wellenlängen aufgeführt sind. Die hierfür gewählte Einheit, 10^{-7} mm, heißt die Ångström-Einheit.

E. Drude.

Anhydride.

1. Definition. 2. Ableitung der Säureanhydride. 3. Bildung und Darstellung der Säureanhydride. 4. Verhalten der Säureanhydride.

1. Definition. Anhydride nennt man Verbindungen, die aus hydroxyl-(OH-) haltigen Stoffen durch Austritt von Wasser entstehen

$$\begin{matrix} R-OH \\ R-OH \end{matrix} = \begin{matrix} R \\ R \end{matrix}\!\!>O + H_2O$$

Die beiden Hydroxylgruppen können demselben oder verschiedenen Molekülen angehören. Der Name Anhydrid ist jedoch nicht mehr für alle so entstandenen Verbindungen gebräuchlich, man pflegt ihn vielmehr jetzt in der Regel auf die Abkömm-

linge der Säuren zu beschränken. Die Anhydride der Basen heißen Oxyde (vgl den Artikel „Oxyde"), die Anhydride der Alkohole Aether (vgl. den Artikel „Aether"). Tritt eine Base und eine Säure unter Wasserabpsaltung zusammen, so erhält man ein Salz (vgl. den Artikel „Salz"). Durch Vereinigung eines Alkohols mit einer Säure entsteht in gleicher Weise ein Ester (vgl. den Artikel „Ester"); Oxysäuren können im eigenen Molekül Wasser abspalten unter Bildung von Laktonen (vgl. den Artikel „Fettsäuren"). Auch den Austritt von Wasser, das bereits als solches in der Verbindung enthalten ist (Kristallwasser) bezeichnet man in der Chemie nicht als Anhydridbildung. In der Mineralogie hat der Anhydrid ($CaSO_4$) seinen Namen davon erhalten, daß er im Gegensatz zum Gips ($CaSO_4$, $2H_2O$) kein Kristallwasser enthält.

2. Ableitung der Säureanhydride. Bei einbasischen Säuren sind zwei Moleküle zur Anhydridbildung erforderlich

$$\begin{array}{l} NO_2-OH \\ NO_2-OH \end{array} = \begin{array}{l} NO_2 \\ NO_2 \end{array}\!\!>O + H_2O$$

Salpetersäure — Salpetersäureanhydrid

$$\begin{array}{l} CH_3-CO\,OH \\ CH_3-COO\,H \end{array} = \begin{array}{l} CH_3-CO \\ CH_3-CO \end{array}\!\!>O + H_2O$$

Essigsäure — Essigsäureanhydrid

Bei mehrbasischen Säuren kann die Anhydridbildung innerhalb eines einzigen Moleküls erfolgen

$$SO_2\begin{array}{l} OH \\ O\,H \end{array} = SO_3 + H_2O$$

Schwefelsäure — Schwefelsäureanhydrid

$$\begin{array}{l} CH_2-CO\,OH \\ CH_2-COO\,H \end{array} = \begin{array}{l} CH_2-CO \\ CH_2-CO \end{array}\!\!>O + H_2O$$

Bernsteinsäure — Bernsteinsäureanhydrid

Es können sich aber auch hier zwei oder mehr Moleküle aneinanderlagern. Anhydrisieren sich hierbei nicht alle Hydroxylgruppen, so behält die neue Verbindung noch den Charakter einer Säure (Anhydridsäuren). Die durch Austritt von 1 Molekül Wasser aus 2 Molekülen einer mehrbasischen Säure gebildeten Anhydridsäuren nennt man Pyro-Säuren im Gegensatz zu den ursprünglichen, nicht anhydrisierten Ortho-Säuren

$$\begin{array}{l} SO_2\begin{array}{l} OH \\ OH \end{array} \\ SO_2\begin{array}{l} O\,H \\ OH \end{array} \end{array} = \begin{array}{l} SO_2\begin{array}{l} OH \\ \; \end{array} \\ \qquad O \\ SO_2\begin{array}{l} \; \\ OH \end{array} \end{array} + H_2O$$

2 Moleküle Schwefelsäure — Pyroschwefelsäure

$$\begin{array}{l} PO\begin{array}{l} OH \\ OH \\ OH \end{array} \\ PO\begin{array}{l} O\,H \\ OH \\ OH \end{array} \end{array} = \begin{array}{l} PO\begin{array}{l} OH \\ OH \end{array} \\ \qquad >O \\ PO\begin{array}{l} OH \\ OH \end{array} \end{array} + H_2O$$

2 Moleküle Phosphorsäure — Pyrophosphorsäure

Die durch Abspaltung von 1 Molekül Wasser aus 1 Molekül einer dreibasischen Säure entstehenden Anhydridsäuren heißen Meta-Säuren

$$PO\begin{array}{l} OH \\ O\,H \\ OH \end{array} = PO\begin{array}{l} OH \\ =O \end{array} + H_2O$$

Phosphorsäure — Metaphosphorsäure

Treten mehr als zwei Moleküle unter Anhydridbildung zusammen, so spricht man von Poly-Säuren

$$\begin{array}{l} SiO\begin{array}{l} OH \\ OH \end{array} \\ SiO\begin{array}{l} O\,H \\ O\,H \end{array} \\ SiO\begin{array}{l} OH \\ OH \end{array} \end{array} = \begin{array}{l} SiO\begin{array}{l} OH \\ \; \end{array} \\ \qquad O \\ SiO \\ \qquad O \\ SiO\begin{array}{l} \; \\ OH \end{array} \end{array} + 2H_2O$$

3 Moleküle Kieselsäure — Poly-(Tri-)kieselsäure

Anhydridbildung kann nicht nur zwischen den Hydroxylgruppen gleichartiger, sondern auch verschiedenartiger Moleküle erfolgen; man erhält in diesem Falle gemischte Anhydride

$$\begin{array}{l} SO_2\begin{array}{l} OH \\ OH \end{array} \\ NO-O\,H \end{array} = \begin{array}{l} SO_2\begin{array}{l} OH \\ \; \end{array} \\ NO \end{array}\!\!>O + H_2O;$$

Schwefelsäure und salpeterige Säure — Nitrosylschwefelsäure

$$\begin{array}{l} CH_3-COO\,H \\ C_2H_5-CO\,OH \end{array} = \begin{array}{l} CH_3-CO \\ C_2H_5-CO \end{array}\!\!>O + H_2O$$

Essigsäure und Propionsäure — Acetpropionanhydrid

3. Bildung und Darstellung der Säureanhydride. Manche Säuren spalten schon bei gewöhnlicher Temperatur Wasser ab und gehen in ihr Anhydrid über wie z. B. Kohlensäure und schweflige Säure

$$H_2CO_3 = CO_2 + H_2O;\ H_2SO_3 = SO_2 + H_2O$$

In anderen Fällen ist hierzu eine höhere Temperatur erforderlich wie bei der Kieselsäure.

Von den zweibasischen organischen Säuren geben jene beim einfachen Erhitzen Anhydride, bei denen hierdurch ein fünf- oder sechsgliedriger Ring gebildet wird z. B. Bernsteinsäure und Phtalsäure, nicht aber Isobernsteinsäure, sowie Iso- und Terephtalsäure

$$\begin{matrix} CH_2-COOH \\ CH_2-COOH \end{matrix} = \begin{matrix} CH_3-CO \\ CH_3-CO \end{matrix}\!>\!O + H_2O$$

$$C_6H_4(COOH)_2 = C_6H_4(CO)_2O + H_2O$$

Durch Erhitzen der einfach sauren Salze der mehrbasischen Säuren erhält man Salze der Pyrosäuren, während die zweifach sauren Salze hierbei die Salze der Metasäuren liefern (Anhydridsalze)

$$2\,KHSO_4 = K_2S_2O_7 + H_2O$$
$$2\,Na_2HPO_4 = Na_4P_2O_7 + H_2O$$
$$NaH_2PO_4 = NaPO_3 + H_2O$$

In vielen Fällen muß die Wasserabspaltung durch Zusatz eines wasserentziehenden Mittels befördert werden. Als solches benutzt man häufig das Anhydrid einer anderen Säure

$$2HNO_3 + P_2O_5 = N_2O_5 + 2HPO_3$$

$$2C_{16}H_{32}O_2 + \begin{matrix} CH_3-CO \\ CH_3-CO \end{matrix}\!>\!O = \begin{matrix} C_{16}H_{31}O \\ C_{16}H_{31}O \end{matrix}\!>\!O + 2\,C_2H_4O_2$$

Manche Anhydride entstehen durch Oxydation der Elemente

$$C + O_2 = CO_2;\ S + O_2 = SO_2$$

Auch durch Einwirkung von Säurechloriden auf die Alkalisalze der Säuren erhält man Anhydride

$$CH_3-COCl + CH_3-COOK = \begin{matrix} CH_3-CO \\ CH_3-CO \end{matrix}\!>\!O + KCl$$

4. Verhalten der Säureanhydride. Die Säureanhydride besitzen neutralen Charakter. Durch Aufnahme von Wasser gehen die meisten mehr oder weniger leicht wieder in Säuren über

$$P_2O_5 + 3\,H_2O = 2\,H_3PO_4$$

$$\begin{matrix} CH_3-CO \\ CH_3-CO \end{matrix}\!>\!O + H_2O = 2\,CH_3-COOH$$

Doch gibt es auch sehr beständige Anhydride z. B. SiO_2.

Mit Alkoholen vereinigen sie sich in der Regel zu Estern

$$\begin{matrix} CH_3-CO \\ CH_3-CO \end{matrix}\!>\!O + 2\,C_2H_5-OH = 2\,CH_3-COOC_2H_5 + H_2O$$

Mit Ammoniak geben sie häufig das Säureamid und das Ammoniumsalz der Säure

$$\begin{matrix} CH_3-CO \\ CH_3-CO \end{matrix}\!>\!O + 2\,NH_3 = CH_3-CONH_2 + CH_3-COONH_4$$

Mit Salzsäure bilden sie zuweilen Säurechlorid und Säure

$$SO_3 + HCl = SO_2\!<\!\begin{matrix} Cl \\ OH \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} CH_3-CO \\ CH_3-CO \end{matrix}\!>\!O + HCl = CH_3-COCl + CH_3-COOH$$

W. Meigen.

Annelidae.

1. Morphologie: a) Die Körperregionen. b) Parapodien und Borsten. c) Die Leibeshöhle. d) Haut und Muskulatur. e) Nervensystem und Sinnesorgane. f) Darmkanal. g) Blut und Atmung. h) Nephridien. i) Gonaden und Fortpflanzung. 2. Ontogenie: a) Einleitung. b) Furchung des Eies bis zum 64-Zell-Stadium. c) Zellmosaik der fertigen Blastula. Lagerung und prospektive Bedeutung der fünf Quartette. d) Gastrulation. e) Die Keimblätter. f) Entstehung der Trochophora-Organe. g) Entstehung der Wurmorgane. h) Metamorphose. i) Besonderheiten der direkten Entwickelung bei Oligochäten und Hirudineen. 3. Systematische Uebersicht. 4. Biologie (Oekologie) und Verbreitung.

1. Morphologie. 1a) Die Körperregionen. Die Anneliden sind Würmer mit meist langgestrecktem Körper, der oft schon äußerlich (Archiannelida, Chaetopoda) eine Gliederung in einzelne Metameren oder Segmente (daher „Ringelwürmer") erkennen läßt, und einen mehr drehrunden oder vom

Rücken zum Bauch, d. i. dorsiventral, abgeplatteten Querschnitt aufweist. Die Gliederung (Segmentierung) ist bei den Hirudineen, die nach Livanow stets 32 Metameren besitzen, durch eine sekundäre Ringelung und durch das Verschmelzen einer Anzahl von Segmenten vorn und hinten zu saugnapfähnlichen Haftscheiben, äußerlich verwischt. Bei den Echiuroidea ist sie meist nur während der Entwickelung, bei den Sipunculoidea überhaupt nicht mehr zu erkennen.

Das im Gegensatz zu dem übrigen, den „Rumpf“ bildenden Körper als „Kopfabschnitt“ bezeichnete Vorderende enthält die stets ventral gelegene Mundöffnung und trägt bei den Archiannelida und den Chaetopoda einen das Cerebralganglion enthaltenden Fortsatz, das Prostomium (Kopflappen). Das den Mund umgebende Segment wird Peristomium genannt und ist mit wenigen Ausnahmen (Aphrodite, Nephthys, Capitella) borstenlos. Häufig sind vorn mehrere Segmente miteinander äußerlich und innerlich verschmolzen, so daß sie höchstens durch die Art ihrer Innervierung oder an ihren noch vorhandenen Anhängen erkannt werden können. Ueber diese Verhältnisse am Vorderende der Anneliden haben Racovitza 1896, Viguier 1896, Pruvot 1885 und Gravier 1899 berichtet. Das Vorderende der Chloraemidae, Sternaspidae und der Telethusae kann mehr oder weniger zurückgezogen und eingestülpt werden. Der Kopflappen ist bei einigen Oligochaeten (Rhinodrilus, Nais lacustris) stark verlängert und zurückziehbar, bei den Echiuroidea ist er immer rüsselförmig ausgezogen. Sehr lang ausgestreckt werden kann er bei Bonellia, wo sein vorderes Ende außerdem gegabelt ist. Die Sipunculoidea können ihr Vorderende wie einen Rüssel einstülpen.



Fig. 1. Bonellia viridis ♀.

Die einzelnen Metameren des Rumpfes gleichen einander gewöhnlich bis auf das letzte, das Analsegment (Pygidium), nur daß nach hinten zu ihre Dimensionen geringer zu werden pflegen; doch findet sich auch nicht selten der Rumpf durch eine besondere Ausbildung bestimmter Segmente in 2, dann als Thorax und Abdomen bezeichnete (Capitellidae, Sabellidae, Serpulidae), oder mehrere Regionen gegliedert. Vor allem bei den in Röhren lebenden Familien der Polychaeten ist das der Fall im engen Zusammenhang mit ihrer Lebensweise; wohl am stärksten ausgeprägt bei den Chaetopteridae. In manchen Polychaetenfamilien tritt eine Umbildung gewisser Rumpfmetameren im Zusammenhang mit der Geschlechtsreife auf, so daß durch diese sogenannte Epitokie (auch Epigamie) epitoke Formen, manchmal auch Heteroformen genannt, entstehen.

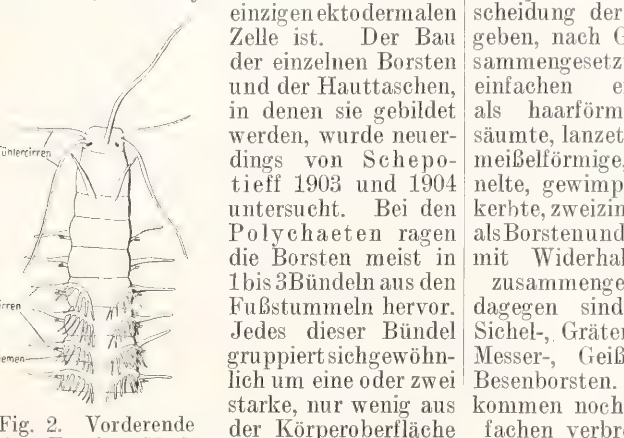
Das Analsegment ist mitunter gegen die vorhergehenden Körperringel etwas verdickt, meist in besonderer Weise als Abschluß des Körpers nach hinten umgebildet oder mit lappigen Anhängen versehen. Es enthält die nur selten nicht endständige Afteröffnung.

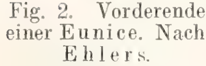
1b) Parapodien und Borsten. Bei den Polychaeten tragen die einzelnen Körperringel seitliche Fortsätze, Parapodien oder Fußstummel, die sich nach außen in je einen oberen (Notopodium) und unteren (Neuropodium) Ast teilen können, von denen jeder wieder eine weitere Gliederung in lappige Fortsätze, Züngelchen und Lippen, aufweisen kann. Den Parapodien der Eunicidae, Syllidae und Phyllodocidae fehlt der obere Ast, und bei vielen in Röhren lebenden Polychaeten sind sie bis auf nur wenig aus der Körperoberfläche hervorragende Borstenhöcker oder Borstenwülste rückgebildet. Häufig tragen die Parapodien fadenförmige Anhänge, Cirren, und zwar meist je einen dorsalen und einen ventralen, die ursprünglich als eine Art Fühler dienen, die aber auch blattartig verbreitert als Ruderplatten fungieren können, oder die, auf der Dorsalseite wenigstens, in Form breiter Schuppen sich dachziegelig deckend (Elytren) den Wurm schützen. Duncker 1905 wies die Homologie von Cirren und Elytren nach. Auf der Dorsalseite der Parapodien oder Segmente finden sich nicht selten fadenförmige oder baum- resp. kammförmig verästelte Anhänge, die als Kiemen der Atmung dienen und öfters ebenfalls aus Cirren hervorgegangen sind.

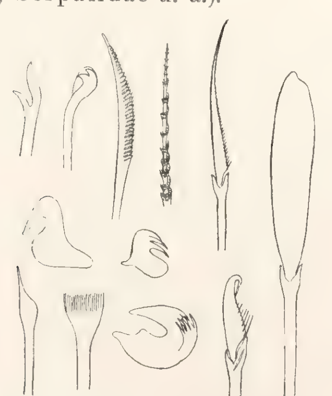
Am Vorderende sind die Anhänge oft besonders umgebildet, indem die Parapodien rudimentär werden oder ganz fehlen, während die Cirren hier häufig als sogenannte Fühlercirren besonders stark und lang sind. Das Prostomium trägt meist eine Anzahl von Fühlern (Tentakel) und bei den Aphroditidae, Lycoridae, Syllidae, manchen Eunicidae und den Chloraemidae auch noch ein paar ventrale Anhänge, die Palpen. Während die Fühler der meisten Polychaeten solide sind, sind die der Spionidae, Polydoridae, Chaetopteridae, Magelonidae und Ammocharidae hohl und können sehr stark verkürzt sowie durch

den Druck der in ihnen enthaltenen Flüssigkeit lang ausgestreckt werden. Aehnlich verhalten sich die Fühler von Protodrilus und Saccocirrus. Das Vorderende der Sipunculidae trägt einen Kranz von bewimperten Tentakeln. Auch am Analsegment sind die Cirren meist besonders lang und heißen Aftercirren.

In vielen Segmenten der Chaetopoden sind chitinige Borsten (Chaetae, Setae) vorhanden, deren jede das Produkt einer einzigen ektodermalen Zelle ist. Der Bau der einzelnen Borsten und der Hauttaschen, in denen sie gebildet werden, wurde neuerdings von Schepotieff 1903 und 1904 untersucht. Bei den Polychaeten ragen die Borsten meist in 1 bis 3 Bündeln aus den Fußstummeln hervor. Jedes dieser Bündel gruppiert sich gewöhnlich um eine oder zwei starke, nur wenig aus der Körperoberfläche vorstreckbare Stützborsten (Aciculae). Nicht immer stehen die Borsten in Bündeln, sondern sie sind in Querreihen angeordnet oder als Hakenborsten auf seitliche, die Parapodien vertretende Wülste der Körperoberfläche (Tori uncinigeri) verteilt (Terebellidae, Sabellidae, Serpulidae u. a.).



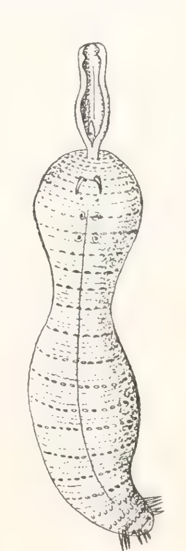

Fig. 2. Vorderende einer Eunice. Nach Ehlers.


Fig. 3. Polychaetenborsten.

Die Oligochaeten besitzen nur wenige Borsten im Verhältnis zu den Polychaeten, welche in einem Segment entweder in 4 Bündeln angeordnet sind, oder welche zu 8 in einem Segment stehen, endlich auch ringförmige Reihen um das Segment bilden. Einzelne Oligochaeten besitzen überhaupt keine Borsten (Anachaeta, Branchiobdella). Dies ist die Regel für die Hirudineen, von denen allein die eine Uebergangsform von den Oliogochaeten darstellende Acanthobdella einige Borsten aufweist.

Man teilt die Borsten, die größtenteils als Lokomotionshebel oder zum Festhalten in den Wohnröhren dienen, und die nach ihrer Gestalt und Anordnung wichtige Anhaltspunkte für die systematische Unterscheidung der Familien und Gattungen abgeben, nach Grube ein in einfache und zusammengesetzte. Die einfachen erscheinen als haarförmige, gesäumte, lanzettförmige, meißelförmige, gezähnelte, gewimperte, gekerbte, zweizinkige oder als Borsten und Stacheln mit Widerhaken; die zusammengesetzten dagegen sind Spieß-, Sichel-, Gräten-, Pfeil-, Messer-, Geißel- oder Besenborsten. Dazu kommen noch die einfachen verbreiterten Hakenborsten und die Plattborsten (Paleen). Die Borsten der Oligochaeten sind immer einfache, meist an dem äußeren Ende hakenförmig umgebogene, deren Mitte nicht selten knopfartig verdickt ist. Oefters stehen einige besonders große und eigentümlich umgestaltete Borsten in Zusammenhang mit der Geschlechtstätigkeit (Geschlechtsborsten). Die Echiuridea besitzen vorn auf der Ventralseite an der Stelle des larvalen 1. Segments 2 starke Hakenborsten und außerdem 1 bis 2 Hakenkränze am Hinterende.


Fig. 4. Oligochaetenborsten.


Fig. 5. Echiurus. Nach Greeff aus Claus-Grobben.

1c) Die Leibeshöhle. Zwischen der Körperwand und dem den ganzen Rumpf der Anneliden durchziehenden Darm liegt ein Hohlraum oder ein System von solchen, die sekundäre Leibeshöhle (Cölom), die mit einem Epithel (Peritoneum) ausgekleidet ist. In ihrer ursprünglichen Form, wie sie sich besonders bei den Archianneliden erhält, besteht die Leibeshöhle aus einer Anzahl von einzelnen Säckchen, von denen je

eines in jedem Segment rechts und links neben dem Darm liegt. Man nennt den an die Körperwand stoßenden Teil des Peritoneums Somatopleura, den den Darm umhüllenden, Splanchnopleura, und die aufeinanderstoßenden vorderen und hinteren Wände je zweier Säckchen bilden die Dissepimente oder Septen. Die über und unter dem Darm aufeinander treffenden Teile der beiden Cölomsäckchen jedes Segments dienen als Aufhängebänder des Darmes (Mesenterien). Durch transversal die Leibeshöhle durchsetzende Muskeln kann jeder Cölomabschnitt nochmals in 2 meist ungleiche Abteilungen (Darm- und Seiten- oder Geschlechtskammer) geschieden werden. Bei den Chaetopoden pflegen die Septen meist nur im ventralen Teile der Leibeshöhle erhalten zu bleiben, so daß die einzelnen Leibeshöhlenabschnitte jeder Seite miteinander in offener Verbindung stehen. Vor allem schwinden die Septen bei den Erwachsenen der im Boden grabenden oder in Röhren lebenden Polychaeten. Mitunter werden Thorax und Abdomen durch ein besonders starkes Septum (Diaphragma) getrennt und auch bei den Echiuroidea trennt ein solches die Kopfhöhle von dem übrigen Cölom. Die Leibeshöhle reicht sowohl in die Parapodien wie in die basalen Glieder der Fühlercirren und Palpen hinein.

Das Cölom der Hirudinea ist durch Bindegewebe und die mächtig entwickelte Muskulatur bis auf ein System von oft mit kontraktilen Wänden versehenen Kanälen und Lakunen sowie Sinussen reduziert. Im allgemeinen sind 4 Längslakunen vorhanden, die durch ein Lakunennetz verbunden sind und mit ringförmigen hypodermalen Hohlräumen in Verbindung stehen. Bei den Echiuroidea werden im Embryonalstadium zwar metamere Cölomsäckchen angelegt, die Dissepimente schwinden aber bald, sodaß ein einheitlicher Cölomraum vorhanden ist. Auch die geräumige Leibeshöhle der Sipunculoidea ist einheitlich, nur vorn gliedern sich von ihr ein dorsaler und ein ventraler Blindsack ab, welche durch einen Ringkanal mit den Hohlräumen in den Tentakeln kommunizieren. Ebenso sind auch hier unter der Haut verstreichende Kanäle Teile des Cöloms.

Fig. 6. Schematischer Querschnitt durch Glossosiphonia. Nach Kowalewsky.

Die Leibeshöhle sehr vieler Oliochaeten steht durch dorsale Poren, die u. a. von Ude untersuchten Rückenporen, mit der Außenwelt in Verbindung.

In dem Kopflappen von Polygordius finden sich Hohlräume, die nach Woltereck Reste des Blastocöls sind, und ebenso umgibt den Anfangsdarm dieses Archianneliden ein Raum, der nach demselben Autor aus einer Verschmelzung des Blastocöls mit einem Schizocöl entsteht. Bei den Chätopoden herrschen wahrscheinlich teilweise ähnliche Verhältnisse, die aber noch nicht geklärt sind.

Die Leibeshöhle der Anneliden enthält eine Flüssigkeit (Cölomflüssigkeit), in der meist amöboid bewegliche Zellen (Amöbocyten, Cölomocyten) und oft auch noch andere Körperchen flottieren. Wo ein Blutgefäßsystem fehlt, kann das Cölom auch noch das Blut enthalten. Die Cölomflüssigkeit hat die gleiche Funktion wie etwa die Lymphe der Wirbeltiere, d. h. sie führt den einzelnen Organen die von der Darmwand verarbeitete Nahrung zu und bringt die von den Körperzellen ausgeschiedenen stickstoffhaltigen Stoffwechselprodukte zu den Exkretionsorganen.

1d) Haut und Muskulatur. Die Körperwand der Anneliden wird von dem sogenannten Hautmuskelschlauch gebildet, wie der Name sagt, eine Verbindung von Muskulatur mit der Haut.

Die Haut ist fast immer ein einfaches Epithel, dessen Zellen (Hypodermiszellen) nach außen eine Cuticula, ein Faserwerk mit hineingelagerter Zwischensubstanz, ausscheiden. Die Substanz dieser Cuticula ähnelt dem Chitin der Insektenhaut und ist in Pottasche löslich (Eisig). Auf der dem Körper zugewandten Seite sitzen die Hypodermiszellen einer Basalmembran, der Stützlamelle auf. Zwischen ihnen finden sich, besonders zahlreich auf der Bauchseite, einzellige Drüsen, die mitunter sehr stark entwickelt sein können, so vor allem in der Geschlechtsregion der Oligochaeten und Hirudineen, wo sie die Ursache einer ringförmigen Verdickung der Haut (Sattel, Gürtel, Clitellum) sind. In den Parapodien der Polychaeten pflegen große Drüsen zu liegen, die als Spinndrüsen das Material für den Röhrenbau dieser Würmer liefern. Stellenweise ist die Haut bewimpert, so bei Archianneliden und Ophryotrocha in Gestalt von Wimperringen, bei Röhrenwürmern oft als Auskleidung einer ventralen Längsfurche (Kotrinne). Von den Oligochaeten besitzt nur Aeolosoma bewegliche Cilien. Ueber die ganze Körperoberfläche verstreut, besonders zahlreich aber an den Fühlern, Palpen, Fühlercirren und Cirren sind Sinneszellen, die an ihrer freien Oberfläche Borsten, Härchen oder auch bewegliche

Wimpern tragen, rezipierende Elemente für mechanische oder chemische Reize; bei den Oligochaeten sind solche Zellen oft zu Sinnesknospen zusammengedrängt. Hinter dem Kopflappen vieler Chaetopoden, auch bei Polygordius, ist die Haut rechts und links grubenförmig eingesenkt und mit Flimmerepithel ausgestattet und bildet so die wahrscheinlich chemische Reize aufnehmenden Flimmergruben (Nackenorgane). Unter der Epidermis der Echiuroidea liegt noch eine Unterhaut, unter der der Sipunculoidea eine bindegewebige Cutis.

Die Stammmuskulatur liegt zwischen der Stützlamelle der Haut und der Somatopleura. Es sind gewöhnlich 4 Längsmuskelbänder, 2 dorsale und 2 ventrale vorhanden, die oben und unten durch das Herantreten der Mesenterien an die Haut, seitlich in der Regel durch schräg die Leibeshöhle durchsetzende Muskeln (Transversalmuskeln) voneinander getrennt werden. Die Längsmuskeln sind bei den meisten Anneliden zusammengesetzt aus flachen Lamellen, die auf dem Querschnitt wie die Blätter eines Buches nebeneinander stehen. Jedes dieser Muskelbänder reicht durch mehrere Segmente und enthält die von dem plasmatischen, der Körpermitte zugewandten Teile einer einzigen Zelle abgeschiedenen kontraktilen Fibrillen. Manchmal, so bei den größeren Oligochaeten zeigt der Querschnitt eines solchen Muskelbandes eine kompliziertere Struktur, andererseits finden sich bei den Hirudinea röhrenförmige Längsmuskeln.

Gewöhnlich werden die Längsmuskelbänder von einer mehr oder weniger starken Ringmuskulatur umgeben.

Bei den Oligochaeten, Echiuroidea und Sipunculoidea fehlen die Transversalmuskeln, bei den Hirudinea werden sie durch zahlreiche vom Rücken zum Bauch ziehende Dorsoventralmuskeln ersetzt.

Durch die Kontraktionen dieser verschiedenen Elemente der Stammuskulatur werden die großen Bewegungen des Annelidenkörpers, wie Strecken, Sich-Verkürzen, Dünner- oder Stärkerwerden und seitliche Bewegungen sowie das Einbohren in den Untergrund ermöglicht.

Es finden sich nun noch zahlreiche andere Muskeln in dem Annelidenkörper, die zur Bewegung der Organe und ihrer Teile dienen. So durchziehen vielfach Muskelfasern die Leibeshöhle, einerseits an der Haut, andererseits am Darm befestigt; das Vorderende der Sipunculoidea ist durch 4 starke Retraktoren einstülpbar. Vor allem zur Bewegung der Parapodien und der Borsten sowie der Palpen und sonstigen Anhänge sind besondere Muskeln ausgebildet. Auch der Darm wird in seiner ganzen Länge von einer inneren Ring- und einer äußeren Längsmuskelschicht umgeben. Schließlich verlaufen auch in den Septen Muskelfasern, und da, wo die Dissepimente an den Darm stoßen, kann dessen Ringmuskulatur zu Sphinkteren verstärkt sein.

1e) Nervensystem und Sinnesorgane. Das aus dem Ektoderm hervorgehende Nervensystem liegt bei den Archianneliden, Protochaeten und manchen Polychaeten zeitlebens in der Haut, während es bei den anderen Anneliden in die Leibeshöhle tritt. Es ist bei allen Anneliden nach demselben Prinzip gebaut: ein im Kopflappen über dem Anfangsdarm gelegenes paariges Cerebralganglion steht durch 2 Schlundkommissuren mit einem Unterschlundganglion in Verbindung, von dem nach hinten der paarige Bauchstrang zieht, gebildet von in den einzelnen Segmenten gelegenen Bauchganglien, die durch Längskonnektive und durch Querkommissuren miteinander verbunden sind, so daß da, wo die beiden seitlichen Hälften dieses Bauchstranges nicht, wie es oft geschieht, miteinander verschmolzen sind, ein typisches Strickleiternervensystem entsteht, so vor allem im Vorderende der Serpulidae. Von allen Ganglienanschwellungen gehen periphere Nerven aus, welche teils sensibel oder motorisch oder gemischter Natur sind; nicht selten finden sich an diesen Nerven besondere Ganglien, so vor allem in den Parapodien und an den die Fühlercirren innervierenden Nerven. Auf dem Darm zieht ein sympathisches Nervensystem, das mit dem Hauptnervensystem in Verbindung steht, entlang und pflegt besonders am Schlund stark entwickelt zu sein, wo auch die meisten der in ihm auftretenden Ganglien liegen.

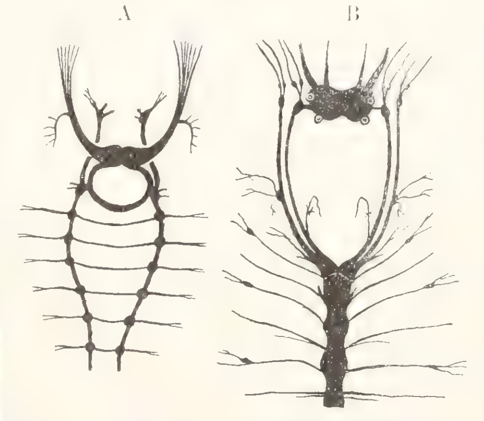


Fig. 7. Gehirn, Unterschlundganglien und Bauchnervenstrang A von Serpula. B von Nereis. Nach Quatrefages.

Entsprechend der gelegentlichen Ver-

schmelzung mehrerer Segmente vereinigen sich auch öfters die Ganglien der betreffenden Körperabschnitte. So sind vor allem bei den Hirudineen das Ober- und Unterschlundganglion und die letzte große Bauchganglienanschwellung solche Ganglienkomplexe. Bei dieser Annelidengruppe verstreicht in dem Bauchmark auch noch ein dritter unpaarer Nerv, der Faivresche oder Leydigsche. Der Bauchstrang der Sipunculidae enthält keine metamer geordneten Ganglien, sondern diffus verteilte Ganglienzellen, gibt aber ebenso wie der der Echiuridae einige paarige Nerven ab. Den Echiuridae und den Priapulidae fehlen auch eigentliche Cerebralganglien; die Ganglienzellen sind bei ihnen diffus auf einem den Oesophagus umgebenden Nervenring verteilt.

Die anatomische und histologische Struktur des Nervensystems der Anneliden ist vielfach untersucht worden, u. a. von Retzius 1891 bis 1902, und mit der Physiologie des Nervensystems, der Reizfortleitung usw. haben sich beschäftigt u. a. Steen, Loeb, Jenkins and Carlson. Es sei hier noch bemerkt, daß vielfach Stützzellen (Gliazellen) mit ihren Ausläufern zwischen die eigentlichen nervösen Elemente vor allem des Bauchstranges verteilt sind. Zu diesen gehören auch die sogenannten Neurochorde, Ausläufer von Riesenzellen, die als eigentlich stützendes Element eine röhrenförmige Scheide aufweisen.

Die Organe des Tastsinnes werden durch einzelne oder in Gruppen über die ganze Haut verstreute, an ihrer freien Oberfläche Härchen und Borsten tragende Sinneszellen repräsentiert, die besonders zahlreich an den Fühlern und Cirren sind. Inwieweit solche Zellen allein dem Getast dienen, ist nicht leicht festzustellen; wahrscheinlich vermitteln viele von ihnen auch chemische Reize. Das geschieht sicher bei den ähnlich gebauten Sinneszellen auf den Palpen der Polychaeten, sowie bei den zu knospenförmigen Geschmacksorganen am Mundrand und in der Mundhöhle der Anneliden zusammengescharten. Chemische Sinnesorgane sind ferner die erwähnten Flimmergruben der Polychaeten, die bei manchen (Opheliidae, Capitellidae) ausgestülpt werden können. Vielfach finden sich freie Nervenendigungen in der Haut, die vielleicht mehrere Reizarten, mechanische, chemische oder photische rezipieren.

Statische Organe kennt man bisher nur von wenigen Polychaeten, so ein Paar am Schlundringe von Arenicola; sodann finden sie sich bei Serpuliden und jungen Terebelliden. Sie sind beschrieben worden von Fauvel 1902 und 1907.

Sehorgane fehlen teils ganz (manche Archiannelida, Oligochaeta und Echiuroidea), teils sind sie als mehr oder weniger kompliziert gebaute Augen vorhanden. Bei Lumbricus finden sich pigmentlose Nervenzellen (Lichtzellen) in und unter der Haut verteilt. Einen einfachen Bau weisen die im Vorderkörper der Hirudinea gelegenen Sehorgane auf, deren Sinneszellen im Innern eine vakuolenartige Bildung besitzen und beim medizinischen Blutegel in 10 Gruppen in je einen Pigmentbecher eingehüllt sind. Manche Sipunculoidea besitzen den Cerebralganglien aufliegende einfache Augenflecke. Nicht nur am Vorderende, sondern auch anderswo kann der Annelidenkörper Sehorgane tragen, so finden sich einfache Ocellen am Hinterende von Myxicola und Fabricia, sowie am hinteren Saugnapf von Piscicola. Die früher als Augen gedeuteten Organe, welche sich zu 12 Paar an einer Reihe von aufeinanderfolgenden Rumpfsegmenten bei Polyophthalmus finden, sind vielleicht Leuchtorgane. Dagegen dienen die mit einer Linse versehenen Organe auf der Bauchseite des pazifischen Palolo nach Woodworth wohl sicher zur Rezeption von Licht-, vielleicht auch von Wärmestrahlen.

Kompliziertere Kameraaugen mit Retina

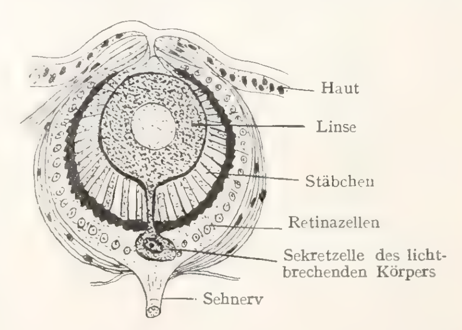


Fig. 8. Auge von Phyllodoce. Nach Hesse.

und Pigmentumhüllung, teils mit, teils ohne Linse, sind häufig am Kopflappen der Polychaeten. Wohl in vollendetster Form sind sie bei den Alicopidae ausgebildet. Branchiomma trägt am Ende eines jeden Tentakels ein an die zusammengesetzten Augen der Arthropoden erinnerndes Sehorgan; und ähnlich gebaute finden sich in regelmäßigen Abständen auf den Fühlfäden der Tentakelkrone von Dasychone. Andrews 1892 hat einiges über die Sehorgane der Polychaeten zusammengefaßt.

1f) Darmkanal. An dem Darmkanal kann man einen entodermalen Mittel- und den ektodermalen Vorder- sowie Enddarm unterscheiden. Die Mundöffnung liegt ventral, nur selten ist sie in Anpassung an besondere Verhältnisse an das vordere Ende des Körpers gerückt. Bei manchen Polychaeten ist der Anfangsdarm (Oesophagus)

zu einem mehr oder weniger muskulösen Schlundsack erweitert; auch sonst pflegt er mit einer kräftigen Muskulatur versehen zu sein und ist oft entweder ganz oder teilweise als Rüssel vorstülpbar; in diesem Falle umgibt dann der nicht ausstülpbare Teil den anderen als Rüsselscheide. Häufig trägt der Rüssel einen Besatz von Papillen oder zahlreichen kleineren Zähnchen (Kieferspitzen), und nicht selten sind in ihm starke chitinige Kiefer mit scharfen Spitzen und Zähnen ausgebildet, die von besonderen Muskeln bewegt werden, durch deren Anwesenheit der betreffende Teil des Rüssels zum Schlundkopf wird. Ein sogenannter Uebergangsteil verbindet den ausstülpbaren Rüssel mit dem übrigen Darm. Dieser Uebergangsteil mancher Polychaeten trägt öfters paarige Blindsäcke, die bei Sylliden dauernd, bei Lycoriden nur in der Jugend rhythmisch pulsieren. Seltener kommen Speicheldrüsen vor (Protodrilus, Syllidae).

Auch die Oligochaeten besitzen einen mehrteiligen Vorderdarm mit muskulösem Schlundkopf und langem Oesophagus. Bei den Lumbricidae reicht letzterer bis ins 13. Segment und ist mit zahlreichen Drüsenzellen versehen. Außerdem finden sich bei den auf dem Lande lebenden Formen und bei Enchytraeiden jederseits mehrere Blindsäcke am Anfangsdarm (Kalksäckchen, Morrensche Drüsen), die kohlensauren Kalk enthalten und oft von vielen Blutgefäßkapillaren durchzogen werden. Während man früher annahm, daß der Kalk von den Wänden dieser Säckchen sezerniert würde, wies Michaelsen darauf hin, daß diese Organe wahrscheinlich Kalk absorbieren. Auf den Oesophagus der Oligochaeten pflegen ein Kropf mit elastischen Wänden sowie ein oder mehrere muskulöse Kaumägen zu folgen.

Die Gnathobdellidae besitzen einen Pharynx mit 3 durch Muskeln gegeneinander beweglichen Kiefern, deren freier Rand mit



Fig. 9. Kopfende des Blutegels. Nach Grobben. Mundhöhle aufgeschnitten, um die 3 Kieferplatten zu zeigen.

Zähnchen besetzt ist. Der Oesophagus der Rhynchobdelliden ist als Rüssel ausstülpbar. Der Anfangsdarm der Kieferegel enthält auch Speicheldrüsen, deren Sekret das Gerinnen des Blutes der angefallenen Beutetiere verhindert. Ein Muskelmagen am Ende des Oesophagus ist bei den Hirudineen gewöhnlich vorhanden; oft findet sich an ihm eine Anzahl von Blindsäckchen. Der Anfangsdarm der Echiuroidea ist als einfacher Schlundabschnitt ausgebildet, ebenso der mit Papillen oder hakenförmigen Zähnen besetzte der Sipunculidae. Die Priapulidae dagegen besitzen wieder einen muskulöse Papillen und Zähne tragenden Schlundkopf.

Der Mitteldarm ist in den meisten Fällen ein gerades einfaches Rohr ohne Anhänge, das bei den Archianneliden und Chaetopoden durch die herantretenden Septen meist intersegmental eingeschnürt wird; nur wenige Polychaeten (Amphictenidae, Ammotrypane, Sternaspis) besitzen einen gewundenen Mitteldarm. Bei den Aphroditidae erweitert sich derselbe segmentweise jederseits zu einem langen Blindsack, dessen mit weiteren kurzen Aussackungen versehenes Ende bis in die Parapodien reicht. Ein Nebendarm, der parallel mit dem Mitteldarm verstreicht und vorn und oft auch hinten in ihn einmündet, findet sich bei Capitelliden und Euniciden. Auf der Dorsalseite der Lumbricidae läuft eine rinnenförmige Einsenkung (Typhlosolis), durch welche die resorbierende Darmoberfläche vergrößert wird. Der Mitteldarm der Hirudinea ist entweder segmentweise eingeschnürt, oder er trägt, so bei Hirudo, in jedem Segment ein Paar blindsackartiger Erweiterungen, die nach hinten zu durch mehrere Segmente reichen können und deren letztes Paar besonders lang ausgebildet ist. Mitunter schließt sich bei den Hirudineen an diesen Teil des Darmes noch ein manchmal mit Blindsäcken versehener Chylusdarm. Die Echiuroidea besitzen einen ziemlich langen, deshalb in Windungen gelegten Mitteldarm, dem ein vorn und hinten in ihn mündender Nebendarm parallel geht, und auch die Sipunculidae haben einen langen zu einer spiraligen Schleife gedrehten Mitteldarm, während dieser bei den Priapulidae gerade verläuft. Bei allen Sipunculoidea wird der Mitteldarm durch zwischen ihm und der Leibeswand ausgespannte Fäden in seiner Lage gehalten. Irgendwelche besonders abgesetzte Mitteldarmdrüsen sind nirgends bei Anneliden vorhanden.

Der Enddarm ist ein einfaches Rohr, das terminal, nur bei manchen Amphinomidae und Aphroditidae, auch bei den Hirudinea infolge der Anwesenheit des hinteren Saugnapfes mehr dorsal, durch den After nach außen mündet. Bei den Echiuroidea wird das letzte Stück des Darmes durch die Einmündung der Exkretionsorgane zur Kloake, und bei den Sipunculoidea besitzt der Enddarm 2 Analdrüsen.

1g) Blut- und Atmung. Ein Blutgefäßsystem fehlt nur selten (Glycera,

Capitella, Polycirrus). Immer ist es ein geschlossenes und zeigt es ein bestimmtes Schema der Anordnung, das bei den Archianneliden und Protochaeten rein beibehalten wird, bei den übrigen Anneliden durch spezielle Differenzierungen oft eine kompliziertere Gestalt annimmt. Fuchs 1906 gibt eine Uebersicht über die Topographie der Chaetopodengefäße. Es setzt sich zusammen aus einem kontraktilen dorsalen und einem ventralen Längsgefäß, die durch intersegmentale paarige Schlingen miteinander in Verbindung stehen, meist auch noch mit einem den Darm umgebenden Blutsinus

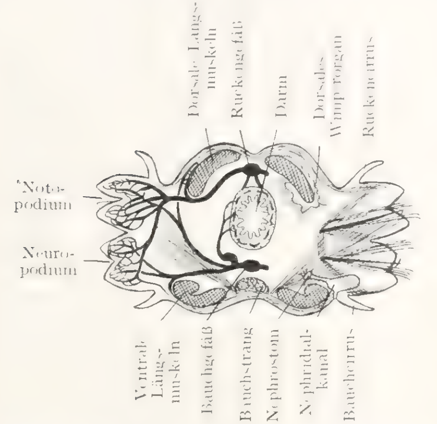


Fig. 10. Querschnitt durch den Rumpf von Nereis. Nach Benham. Blutgefäße schwarz.

(Cirratulidae, Terebellidae, Opheliidae, Spionidae, Serpulidae) oder einem wohl aus einem solchen hervorgegangenen Darmgefäßnetz kommunizieren. Bei den Polychaeten, deren Rückengefäß manchmal doppelt ist, finden sich dann noch Gefäße, welche die Parapodien und Kiemen

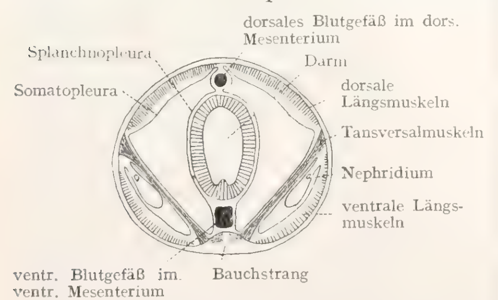


Fig. 10a. Querschnitt durch ein Rumpfsegment von Polygordius.

mit Blut versorgen, auch pflegen bei ihnen ebenso wie bei den Oligochaeten am Bauchnervenstrang und an den Seiten des Körpers besondere Gefäße entlang zu ziehen. Im Rückengefäß mancher Polychaeten liegt als Herzkörper eine Einwucherung von pigmenthaltigen Peritonealzellen, die vielleicht auch als Klappe fungiert. Klappenartige Bildungen, die das Zurückfließen des Gefäßinhaltes verhindern, finden sich auch sonst vielfach bei den Chaetopoden. Der Inhalt des Gefäßsystems wird durch die Kontraktionen des Rückengefäßes nach vorn bewegt und fließt im Bauchgefäß zurück. Selten sind bei den Polychaeten auch einige der intersegmentalen Schlingen kontraktil, was dagegen die Regel ist bei den 5 bis 8 in der Genitalregion der Lumbriciden liegenden seitlichen Schlingen. Das besonders von Johansson und Oka untersuchte Blutgefäßsystem der Hirudinea steht in engem Zusammenhang mit der äußerst reduzierten Leibeshöhle und ist bei den Gnathobdelliden vielleicht ganz in dieser aufgegangen. Im Rückengefäß der Rhynchobdelliden finden sich auch Klappen. Die Echiuroidea besitzen einen den vorderen Teil des Mitteldarmes umgebenden Darmblutsinus, der nach vorn zu in ein Rückengefäß übergeht, das durch 2 seitliche Schlingen mit dem Bauchgefäß in Verbindung steht, welches durch den ganzen Rumpf nach hinten zieht und durch eine Schlinge mit dem Darmsinus kommuniziert. Das Gefäßsystem der Sipunculoidea ist auf einen ringsgeschlossenen Darmsinus reduziert.

Das sich in dem Gefäßsystem bewegende Blut ist entweder farblos oder durch seinen Gehalt an gelöstem Hämoglobin rot gefärbt; bei Chloraemidae, Sabellidae und Serpulidae dagegen wird die rote Farbe durch eine grüne verdeckt. Tiefrot ist das Blut von Lumbricus und Hirudo. Mitunter flottieren farblose Zellen oder sonstige Blutkörperchen in der Flüssigkeit. Bei den gefäßlosen Polychaeten führt die Cölomflüssigkeit hämoglobinhaltige rot gefärbte Zellen, welche das Blut ersetzen. Ueberall bei den Anneliden hat das Blut in erster Linie eine respiratorische Funktion.

Die Atmung geschieht wohl in den meisten Fällen einfach durch die Vermittelung der Haut. Bei zahlreichen Polychaeten werden besondere Stellen derselben, vor allem auf der Dorsalseite der Parapodien und auf dem Rücken von einem reichentwickelten Gefäßsystem durchzogen, was dann bei manchen dieser Würmer zur Ausbildung besonderer respiratorischer Fortsätze, der Kiemen führt (s. Fig. 2), die faden-, baum- oder fiederförmig sich an vielen oder nur einigen Segmenten des Körpers finden. Bei den Glyceridae sind sie einstülpbar. Auch einige Oligochaeten besitzen solche oft retraktilen Kiemen, unter den Hirudineen aber nur Branchellion und Cystibranchus. Neben dieser Haut- und Kiemenatmung findet sich namentlich bei Polychaeten ziemlich häufig eine Atmung mit

Hilfe des Darmes, wobei manchmal rhythmisch in dessen Anfangs- oder Endteil Atemwasser aufgenommen wird.

1h) Nephridien. Als Exkretionsorgane fungieren die Nephridien (Segmentalorgane), die ursprünglich in allen Segmenten mit Ausnahme der ersten und letzten paarweise auftreten. Ein solches Nephridium stellt in der Hauptsache einen geraden oder gewundenen Kanal dar, der durch einen Wimpertrichter (Nephrostom) in die Leibeshöhle und durch einen die Haut durchsetzenden Porus nach außen mündet. Dabei durchbricht der Kanal gleich hinter dem Nephrostom das hintere Septum des Segmentes, in dem seine innere Mündung liegt, und verläuft mit seinem Hauptteile in dem nächsten Segment, in der Seitenkammer, wenn eine solche vorhanden, wo er auch nach außen mündet. Kurz vor dieser äußeren Mündung pflegt er sich zu einer kleinen Harnblase zu erweitern. Goodrich vor allem hat 1895 bis 1900 die Exkretionsorgane der Anneliden ausführlich beschrieben, Vejdovsky 1900 ihre Entwickelung untersucht.

Fig. 11. Schema der Segmentalorgane eines Anneliden. Nach Semper.

Bei Dinophilus und manchen Polychaeten (Glyceridae, Phyllodocidae) sind die Nephridien gegen das Cölom zu geschlossen und besitzen statt des Wimpertrichters sogenannte Solenocyten, das sind

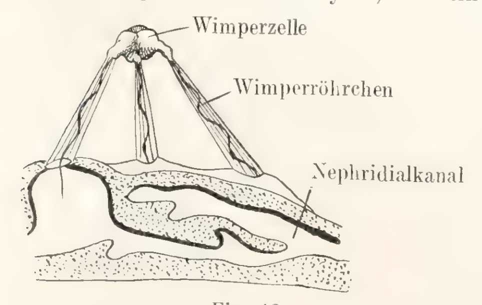


Fig. 12.
Solenocyten von Glycera. Nach Goodrich.

Zellen, die zylindrische Röhrenfortsätze tragen, in deren Lumen eine plasmatische Geißel schwingt. In den Segmenten der Capitelliden können mehr als ein Paar von Nephridien vorhanden sein, während andererseits bei manchen Polychaeten diese Organe auf bestimmte Körperregionen beschränkt sind. So liegen in der Thorakalregion der Terebellidae meist 3 Paar großer Nephridialkanäle mit kleinen Wimpertrichtern, in der der Cirratulidae und Serpulidae sogar nur 1 Paar. Bei Lanice conchilega verbindet jederseits ein Längskanal die 4 Nephridien der hinteren Thorakalregion. Goodrich fand bei Nereis außer den Nephridien noch dorsale Wimperorgane (s. Fig. 10), die über den Rückenlängsmuskeln als Kanäle mit sehr weiter Oeffnung und ohne permanente Ausmündung nach außen vielleicht weniger der Exkretion als vielmehr der Ausführung der Geschlechtsprodukte dienen.

Auch die Oligochaeten besitzen solche Segmentalorgane, deren Kanäle durch besondere Differenzierung ihrer Wandzellen oft in mehrere Abschnitte gegliedert werden (Meganephridien). Manche Megascolecidae führen mehrere Nephridien in einem Segment, die ebenso wie die vieler anderer Oligochaeten mit den vorhergehenden und folgenden durch Kanäle verbunden sein können. Auch findet sich manchmal in einem Segment eine sehr große Anzahl kleiner Nephridialtrichter, deren Kanäle ein Netzwerk bilden, um dann mitunter durch mehr als 100 Oeffnungen in einem Segment nach außen zu münden (Mikronephridien). Manche Nephridialkanäle der Oligochaeten führen auch in den Darm. Bergh bearbeitete vielfach die Exkretionsorgane der Oligochaeten.

Bei den Hirudineen sind die Kanäle der Segmentalorgane mehrfach gewunden (Schleifenkanäle). Ihre von ihnen getrennten Nephrostome, die neuerdings von Loeser beschriebenen sogenannten Wimperorgane, pflegen in eine mit der Ventrallakune der Leibeshöhle zusammenhängende seitliche Lakune (Perinephrostomialsinus) zu münden. Die Harnblase ist hier gewöhnlich ziemlich groß. Bei den Gnathobdelliden finden sich meist 17 Paar solcher Schleifenkanäle. Branchellion und Pontobdella weisen untereinander netzförmig verbundene Segmentalorgane auf.

Die Echiuroidea besitzen 1 bis 4 Paar von ventral ausmündenden Nephridien, (Echiurus 2, Thalassema 4, Bonellia nur 1 unpaares), die metamer angeordnet noch die ursprüngliche Segmentierung andeuten. Zu diesen kommt dann noch 1 Paar großer Nephridien (Analschläuche), die mit dem Enddarm zusammen in die Kloake münden. Die Exkretionsorgane der Sipunculoidea liegen in der Gegend des Afters in Gestalt von 2, seltener nur 1, ventral ausmündenden Bauchdrüsen. Bei den Priapulidae öffnen sie sich nicht in die Leibeshöhle, sondern sind mit Solenocyten besetzt.

Außer diesen eigentlichen Exkretionsorganen beteiligen sich noch andere Organe

an der exkretorischen Tätigkeit, so bei den Polychaeten besondere Stellen des Peritoneums (Chloragogendrüsen), deren mit Endprodukten des Stoffwechsels beladene Zellen sich ablösen, in die Leibeshöhle gelangen und durch die Nephridien nach außen entleert werden. Solche mit grünlichen Körnchen gefüllte Chloragogenzellen bekleiden in großer Zahl die Darmgefäße der Oligochaeten und bilden als Bothryoidalgewebe den Wandbelag der den Darm der Hirudineen umgebenden Lakunen. Wahrscheinlich hat auch der Herzkörper im Rükkengefäß der Polychaeten eine exkretorische Funktion. Grobben 1888 untersuchte die Perikardialdrüsen der Chaetopoden, D. Rosa die Chloragogenzellen der Oligochaeten. In der Leibeshöhle der Sipunculidae finden sich mit Cilien besetzte napfförmige Gebilde, die Urnen, die weil mehrzellig und sich teilend, zeitweilig für Parasiten gehalten, wenn auch nicht gerade exkretorisch tätig sind, so doch allerlei Partikelchen in der Cölomflüssigkeit festhalten und agglutinieren.

1 i) Gonaden und Fortpflanzung. Die Geschlechtsorgane der Anneliden sind meist sehr einfach. Oft bestehen sie nur aus den Keimstöcken; in anderen Fällen kommen zu diesen noch Ausführgänge für die Geschlechtsprodukte. Die Archianneliden, Protochaeten, Polychaeten, Echiuroidea und Sipunculoidea sind getrennt geschlechtlich, eine Ausnahme machen nur wenige zwittrige Formen, wie Polygordius triestinus, Protodrilus, einige Hesionidae, Ophryotrocha, Amphiglena, Amphicora, Haplobranchus, Protula, Salmacina, Spirorbis u. a. Dagegen sind stets zwittrig die Oligochaeten und Hirudineen. Aeußerlich unterscheiden sich die Geschlechter der Polychaeten in der Regel nicht (Ausnahme einige Polynoinae). Wohl aber läßt sich im Zustand der Geschlechtsreife bei vielen Polychaeten das Geschlecht an der Färbung erkennen, in dem die männlichen Würmer infolge der durchschimmernden weißlichen Spermamassen hell, die weiblichen aber von den in der Leibeshöhle aufgespeicherten Eiern gelblich, grünlich oder bläulich erscheinen.

Die Geschlechtsdrüsen entstehen als Wucherungen bestimmter Teile des Peritoneums und kommen paarweise in zahlreichen oder nur wenigen Segmenten gewöhnlich der mittleren Körperregion vor, meist in der Nähe des ventralen Gefäßes oder dessen Abzweigungen, manchmal auch an besonderen blindendenden Verästelungen der seitlichen Gefäßschlingen oder in der Nähe der Nephridien. Die Geschlechtsprodukte fallen bei den Polychaeten in die Leibeshöhle, wo sie eventuell erst ihre volle Reife erlangen, und werden durch die Nephridien oder durch besondere, diesen ganz ähnlich gebaute Kanäle mit großen Wimpertrichtern entleert (Goodrichs Gonodukte und Cölomodukte). Die männlichen Protochaeten haben etwas kompliziertere Geschlechtsausführgänge, die mit je einer Vesicula seminalis und je einem als Kopulationsorgan dienenden Penis in Verbindung stehen, während bei den Weibchen Receptacula seminis vorhanden sind, von denen aus die noch unreifen Eier im Ovarium befruchtet werden. Auch die Capitelliden besitzen in beiden Geschlechtern Kopulationsorgane. Bei manchen Polychaeten mit innen geschlossenen Exkretionsorganen verbindet sich mit deren Kanälen zur Zeit der Reife ein Wimpertrichter, der nun die Ausleitung der Geschlechtsprodukte ermöglicht. Die Geschlechtsausführgänge der Terebellidae, Cirratulidae und Serpulidae liegen in der Abdominalregion dieser Würmer.

Bei Polygordius werden die Geschlechtsprodukte einfach in der Weise entleert, daß die Leibeswand an einer oder mehreren Stellen reißt, so daß die Eier oder das Sperma hinausgelangen können. Der hinter der Bruchstelle liegende Teil des Körpers geht zugrunde, während der vordere dann das Fehlende regeneriert. Die Entleerung der Geschlechtsprodukte geschieht bei Clistomastus auf die gleiche Weise, doch ist es ein ganz bestimmtes, durch einen Schnürmuskel ausgezeichnetes Segment, an welchem das Hinterende abreißt. Diese Verhältnisse leiten über zu den Erscheinungen, die bei manchen anderen Polychaeten die Regel sind, und als Epitokie (Epigamie) bezeichnet werden. Es bildet sich bei diesen Würmern zur Zeit der Geschlechtsreife die eine Körperhälfte, meist die hintere (Phyllodocidae, Hesionidae, Lycoridae, Syllidae, Eunicidae, Glyceridae und Cirratulidae), seltener die vordere (Ceratocephale ossawai, japanischer Palolo, vgl. Izuka 1903 und 1905) zu einem schwimmfähigen Organismus um (sogenannte epitoke Strecke), vor allem durch blattartige Verbreiterung der Parapodien und ihrer Anhänge und durch das Auftreten von Borsten mit breiten schaufelförmigen Anhängen (Schwimmborsten). Dabei pflegen dann die Geschlechter in verschiedener Weise umgebildet zu werden, so daß die reifen Männchen sich von den reifen Weibchen unterscheiden (Geschlechtsdimorphismus). Bei Nereis dumerilii wechseln nicht umgewandelte geschlechtsreife Generationen mit umgewandelten ab (Heterogonie), auch kann ein und dasselbe Tier zweimal geschlechtsreif werden, einmal ohne sich umzuwandeln, dann in der epitoken Form (Dissogonie). Während nun bei den meisten der oben genannten Familien die so ver-

änderten Individuen schwimmend an die Oberfläche des Meeres wandern, um dort ihre Geschlechtsprodukte abzulegen, bleibt bei anderen das Vorderende am Boden, das mit Sperma oder Eiern gefüllte Hinterende dagegen reißt ab und schwimmt allein nach oben (Schizogonie). Das ist vor allem der Fall bei den Schwimmknospen von Syllis hamata und bei den pazifischen Palolowürmern, Eunice viridis und dubia von Samoa, sowie bei dem atlantischen Palolo, Eunice fucata, den A. G. Mayer beschrieb, die alle noch das merkwürdige Verhalten aufweisen, daß sie nur an bestimmten, mit dem Phasenwechsel des Mondes zusammenhängenden Tagen des Jahres in ungeheurer Menge schwärmen, welche Gewohnheit besonders von Friedländer und Krämer ausführlich beschrieben wurde.

Bei manchen Syllidae geht die hier angezeigte Richtung der Umbildung noch weiter, indem der umgewandelte hintere Teil einen eigenen Kopf ausbildet und so zu einem ganz selbständigen Tier wird. Schließlich kann sich dieser Prozeß gleichzeitig mehrmals an demselben Muttertier (Stock, Amme) wiederholen, so daß ganze Ketten von zunächst noch zusammenhängenden, stets gleichgeschlechtlichen Geschlechtstieren (Stolonen, Zoiden) entstehen (Gemmiparie). Ehe man diesen Zusammenhang erkannt hatte, wurden die weiblichen Zoide von Autolytus einer besonderen Gattung Sacconereis, die männlichen ebenso einer Gattung Polybostrichus zugerechnet. Ebenso werden bei Myrianida die Geschlechtstiere durch eine solche Stolonisation gebildet, doch hat man sowohl hier als auch bei Autolytus eine Bildung von Geschlechtsprodukten in dem Stammtier beobachtet, so daß dieses also sowohl direkt geschlechtlich als auch auf dem ungeschlechtlichen Wege der Stolonisation Nachkommenschaft erzeugen kann.

Fig. 13. Ctenodrilus monostylos in Querteilung. Nach Zeppelin.

Wie nun diese Stolonenbildung eine Art ungeschlechtlicher Fortpflanzung darstellt, so kommt eine solche auch bei anderen Polychaeten vor in Gestalt einer einfachen Teilung, wobei das hintere kopflose Stück einen neuen Kopf ausbildet (Filograna, Salmacina, Ctenodrilus). Auch die laterale Knospung bei Syllis ramosa, wo seitlich an den Rumpfsegmenten neue Tiere gebildet werden, sodaß baumförmig verästelte Kolonien entstehen, und die ventroterminale Knospung bei Trypanosyllis, wo etwas vor dem Hinterende ganze Büschel junger Zoide knospen, müssen wohl hierher gerechnet werden. Die sehr interessanten Reproduktionserscheinungen der Sylliden hat Potts 1911 zusammengestellt.

Während alle übrigen Polychaeten Eier ablegen, bringen Syllis vivipara, Cirratulus chrysoderma, Marphysa sanguinea, Nereis diversicolor und manchmal wohl auch Nereis dumerilii lebende Junge zur Welt. Manche Polychaeten zeigen eine Art Brutpflege, indem sie die Eier in ihren Röhren ablegen, befruchten und die heranwachsenden Jungen dort schützend bewachen, oder in dem sie die sich entwickelnde Brut eine Zeitlang mit sich herumtragen, so Exogone und Pionosyllis an den Bauchcirren, Grubea auf dem Rücken, Autolytus in einem ventralen Brutsack, der durch eine besondere Sekretausscheidung gebildet wird. Bei Salmacina und Spirorbis entwickeln sich die Eier in dem Operkulum, einem zu einem Verschlußdeckel der Wohnröhre umgebildeten Kiemenfaden der Tentakelkrone.

Die Geschlechtsorgane der zwittrigen Oligochaeten liegen in bestimmten Segmenten der vorderen Körperregion, die männlichen stets vor den weiblichen. Bei den einzelnen Individuen werden Eier und Sperma zu verschiedenen Zeiten reif, so daß eine Selbstbefruchtung ausgeschlossen ist. Es sind 1 bis 2 Paare Hoden und Ovarien vorhanden, aus denen die Geschlechtsprodukte durch Kanäle mit inneren Wimpertrichtern nach außen entleert werden können. Die Geschlechtsorgane bei den kleineren Formen von einfachem Bau (Aeolosoma mit einfachen ventralen Poren zum Entleeren der

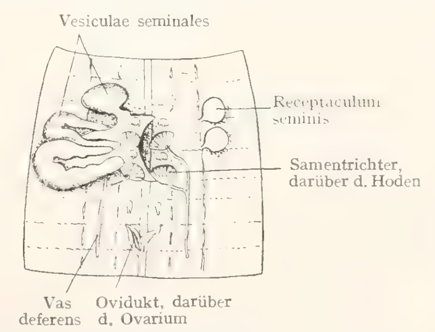


Fig. 14. Geschlechtsorgane von Regenwurm. Nach E. Hering.

Eier) sind bei den meisten Oligochaeten, vor allem bei den Lumbriciden komplizierter. Lumbricus besitzt ein Paar Ovarien im 13. Segment, deren Ovidukte im 14. ausmünden, und je 1 Paar Hoden im 10 und 11. Segment, denen je 1 Paar Wimper-

trichter gegenüberliegen. Die von diesen gerade nach hinten ziehenden Kanäle vereinigen sich jederseits zu einem Vas deferens, das im 15. Segment auf einer ventralen Papille ausmündet. Die Hoden und ihre Wimpertrichter liegen in unpaaren Blasen (Samenkapseln), die rechts und links je 3 Blindsäcke (Vesiculae seminales), Ausstülpungen der entsprechenden Dissepimente aufweisen. Zum weiblichen Geschlechtsapparat sind noch 2 Paar Samentaschen (Receptacula seminis) zu rechnen, die zwischen dem 9. und 10. und zwischen dem 10. und 11. Segment münden und einfache blindsackartige Einstülpungen der Haut darstellen. Es findet bei dem Regenwurm im Juni oder Juli eine Kopulation statt, bei der die beiden Würmer sich mit der Bauchseite in entgegengesetzter Richtung so aneinander legen, daß die Samentaschen eines jeden in der Gegend des Clitellums des Partners zu liegen kommen. Das ausfließende Sperma gelangt durch Wimperrinnen in die Samentaschen des anderen Tieres, worauf sich beide trennen. Später bildet dann jeder für sich aus dem von seinem Clitellum abgeschiedenen Schleim einen Kokon, in welchem er seine Eier mit dem aufbewahrten Sperma des anderen Wurmes befruchtet. Manche Oligochaeten scheiden in diese Kokons auch noch eine eiweißartige Substanz ab, die zur Ernährung der sich entwickelnden Jungen dient. Es sei hier noch erwähnt, daß manche Oligochaeten ihr Sperma in Form von Samenpatronen (Spermatophoren) ablegen.

Auch bei den Oligochaeten geht neben der geschlechtlichen eine ungeschlechtliche Vermehrung einher, indem sich vor allem die Naididae und Aeolosomatidae durch Teilung fortpflanzen; allerdings werden auch hier diese ungeschlechtlichen Generationen im Herbst abgelöst von sich geschlechtlich vermehrenden, so daß auch wieder ein Generationswechsel vorliegt. Nach Kleinenberg teilen sich die sich furchenden Eier von Lumbricus trapezoides, so daß aus je einem Ei mehrere Embryonen hervorgehen.

Die Geschlechtsorgane der zwittrigen Hirudineen bestehen ebenfalls aus mehreren Hodenpaaren und 1 Paar Ovarien. Bei Hirudo sind 9, selten 10 Paar Hoden vorhanden in Gestalt von rundlichen Bläschen, deren Ausführungsgänge in 2 nach vorn ziehende Vasa deferentia führen. Letztere sind vorn aufgeknäuelt (Nebenhoden) und etwas erweitert zu Samenblasen, dann vereinigen sie sich in Form eines ausstülpbaren Ductus ejaculatorius zu dem unpaaren, bei Herpobdella und Rhynchobdellidae 2-zipfeligen, bei vielen Gnathobdellidae U-förmig gebogenen Penis, der vor seiner in der ventralen Mittellinie gelegenen Ausmündung mit einer Drüse (Prostata) versehen ist. Hinter der männlichen Geschlechtsöffnung liegt die ebenfalls unpaare weibliche, in der bei den Rhynchobdelliden die beiden langgestreckten Ovarien ausmünden. Bei den Gnathobdelliden führen 2 Ovidukte die reifen Eier aus den beiden kleinen Ovarien in einen mit einer Eiweißdrüse verbundenen Kanal, der sich zu einer Vagina erweitert, in die bei der Kopulation der männliche Begattungsapparat eines anderen Individuums eingeführt wird. Der männliche Apparat der Rhynchobdellidae und von Herpobdella scheidet eine Spermatophore

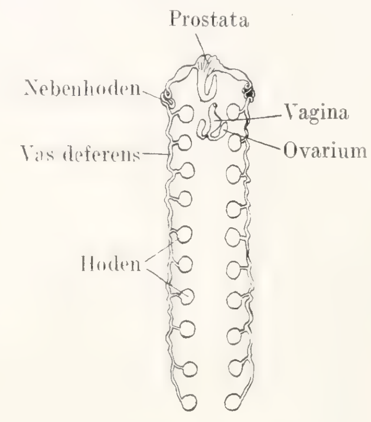


Fig. 15. Geschlechtsorgane des Blutegels. Nach Grobben.

aus, deren chitinige röhrenförmige Hülle in die Haut des Partners gestoßen und so befestigt wird. Das Sperma gelangt dann, wie es Whitman 1891 untersucht hat, durch die Leibeshöhle unter Durchbohrung der Wände der Ovarien in dieselben und befruchtet die Eier. Auch hier läßt zur Zeit der Eiablage die drüsenreiche Haut der Genitalregion einen Schleimkokon entstehen, in den die befruchteten Eier zusammen mit einer eiweißartigen Substanz abgesetzt werden. Manche Hirudineen bilden aber keine Kokons, sondern heften ihre Eier an Steine oder Pflanzenteile. Glossosiphonia trägt die mit ihrem hinteren Saugnapf angehefteten Jungen an ihrer Bauchseite mit sich herum.

Die Geschlechtsdrüsen der Echiuroidea entstehen als unpaare und nur in der Einzahl vorkommende Wucherungen in dem Peritonealepithel oberhalb des Bauchgefäßes im hinteren Körperabschnitt. Die ventralen Nephridien fungieren als Uterus resp. als Vesiculae seminales, indem sie die in das Cölom entleerten Geschlechtsprodukte nach außen führen. Bemerkenswert ist der Geschlechtsdimorphismus von Bonellia, bei der das Männchen im Verhältnis zum Weibchen äußerst klein ist und außer dem gewaltig entwickelten Hoden und dessen Ausführungs-

gang nur rudimentäre Organe besitzt. Gewöhnlich halten sich diese Männchen zu mehreren in dem Uterus des Weibchens auf.

Auch bei den Sipunculoidea führen die beiden in der Aftergegend gelegenen Nephridien die Produkte der beiden an der Basis der ventralen Retraktoren des Vorderendes entwickelten Geschlechtsdrüsen aus, nachdem diese durch Vermittelung des Cöloms in sie gelangt sind. Die Keimdrüsen der Priapulidae sind mit den Wimpertrichtern der beiden sonst geschlossenen Nephridien verwachsen, so daß auch hier die Exkretionsorgane gleichzeitig die Rolle von Ei- und Samenleitern übernehmen.

2. Ontogenie. 2a) Einleitung. Zwei Entwicklungsformen. Bedeutung der „Trochophora". Während die Oligochaeten und Hirudineen eine mehr oder weniger direkte Entwicklung innerhalb des Eikokons durchmachen, wobei es nur zu „larvenähnlichen" Embryonalstadien kommt, entwickeln sich die Archianneliden, Polychaeten, Echiuriden und Sipunculiden vermittels einer typischen freischwimmenden Larve, der Trochophora. Die Trochophora (Fig. 16) stellt einen kugeligen oder interpolar abgeplatteten Körper dar, dessen Aequator von dem Hauptwimperkranz (Prototroch) umzogen wird.

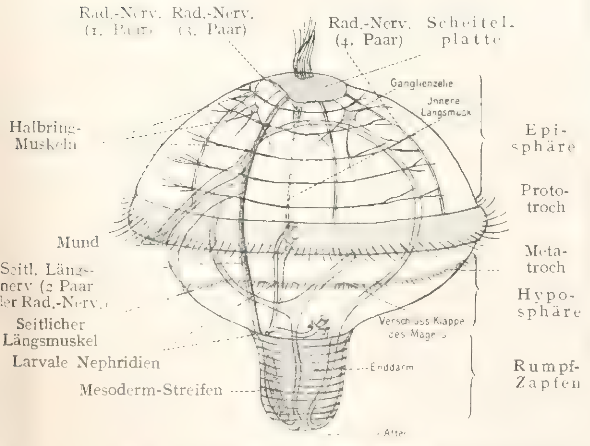


Fig. 16. Trochophora-Larve von Polygordius.

Ferner liegt in dieser äquatorialen Wimperregion der breite, schlitzförmige Mund der Larve. Am oberen Pol befindet sich eine Verdickung des sonst dünnwandigen Epithels, die Scheitelplatte. Am unteren Pol liegt der After, umgeben von der zapfenförmigen Anlage des Wurmrumpfes. Im Blastocöl, welches den Hohlraum der Larve bildet, liegt der kugelförmige Magen, mit dem Munde durch einen schräg aufsteigenden Oesophagus verbunden, während zum After sich der Enddarm erstreckt. Im Blastocöl finden sich ferner einige Muskel- und Bindegewebszellen, sowie die larvalen Nephridien. Der Wandung des ektodermalen Rumpfzapfens liegen von innen die beiden Mesodermstreifen an.

Diese indirekte Entwicklungsform müssen wir als die ältere betrachten, erstens weil die Oligochaeten und Hirudineen ihrer Morphologie und Lebensweise nach von den ursprünglicheren Archianneliden und Polychaeten abzuleiten sind, zweitens weil wir ganz ähnliche Larvenformen auch bei anderen wurmartigen Tieren (Bryozoen, Brachiopoden, Phoronis), ferner bei dem großen Stamm der Mollusken (mit Ausnahme der am meisten differenzierten Gruppen), sowie bei den Enteropneusten finden. Drittens zeigt die typische Trochophora insbesondere der Archianneliden sowohl in ihrer Entwicklung (Anlage der Wimperorgane) als in ihrer Organisation (Scheitelorgan mit 8 Radiärnerven) Merkmale, welche auf die Herkunft aller dieser Formen von turbellarien- oder ctenophorenähnlichen Vorfahren hinzuweisen scheinen (vgl. den Artikel „Würmer"). Bei dieser Sachlage erscheint es zweckmäßig, wenn wir bei unserer Schilderung der Annelidenentwicklung hauptsächlich die bei den Polychaeten und Archianneliden gefundenen Verhältnisse berücksichtigen.

2b) Die Furchung des Eies bis zum 64-Zellen-Stadium. Die Furchung ist am besten bei den indirekt sich entwickelnden Anneliden bekannt, sie folgt hier dem spiralig-radiären Typus, der auch für viele andere Tiere: Mollusken, Polycladen, Nemertinen usw. gilt, und auf den sich auch die noch nicht so gut bekannte Furchung der Oligochaeten und Hirudineen wird beziehen lassen.

Die Eier furchen sich, wenn viel Dotter vorhanden ist, von vornherein inäqual; seltener ist der Dotter gering entwickelt, dann finden wir eine mehr oder minder ausgesprochen äquale Furchung (Polygordius, Podarke, Lepidonotus).

Die Gestalt des unbefruchteten Eies ist zumal bei den letztgenannten Formen häufig linsenförmig; bei der weiteren Entwickelung runden sie sich dann entweder ab (Podarke), oder sie flachen sich bis zur Gastrulation immer mehr zur Scheibenform ab (Polygordius: Fig. 18c). Trotz aller Verschiedenheiten der Form und des Dottergehaltes verläuft jedoch die Furchung durchweg in folgender Weise.

Die beiden ersten Teilungen liefern 4 in einer Ebene liegende Zellen, die den Ausgangspunkt der hier vorliegenden Differenzierungsart bilden. Sie werden als ABCD bezeichnet; jede teilt sich in Uebereinstimmung mit den drei anderen weiter, so daß man später vier zunächst gleichartige „Quadranten" des sich bildenden Embryos unterscheidet. Die Zelle D und der daraus sich entwickelnde D-Quadrant

ist häufig durch besonderen Umfang ausgezeichnet. Sie nimmt die dorsale Fläche des Embryos ein, während B ventral, A und C lateral gelegen sind.

Der dritte Teilungsschritt liefert 8 Zellen, die in zwei Ebenen übereinander liegen. Die oberen, d. h. dem später oberen, animalen Teil des Embryos zugehörenden Zellen sind meistens kleiner als die Zellen der unteren, vegetativen Keimhälfte. Man unterscheidet daher „Micromeren" und „Macromeren" und bezeichnet die vier oberen Zellen des 8-Stadiums als das „erste von den Macromeren abgeschiedene Micromerenquartett".

Es liegen nun nicht die Micromeren gerade über den zugehörigen Macromeren, sondern jede weicht von dem die untere Schwesterzelle schneidenden Meridian nach rechts (also im Sinne der Uhrzeigerbewegung) ab, wenn wir das Ei vom oberen Pol her betrachten. Diese „dexiotrope" Abweichung bewirkt nun, daß die oberen Zellen genau in die Zwischenräume zu liegen kommen, welche die oberen Kuppen der 4 Macromeren zwischen sich frei lassen. Im weiteren Verlauf der Furchung wird durch regelmäßig abwechselnde „läotrope" (nach links abweichende) und dexiotrope Furchung bewirkt, daß immer wieder die jeweils oberen Zellen in solche Zwischenräume der unteren einrücken, so daß eine überaus vollkommene Raumausnützung zustandekommt.

Vierter Teilungsschritt. Die 8 Zellen des ersten Quartetts teilen sich gleichzeitig mit den 4 Macromeren, von welchen jetzt das zweite Micromerenquartett sich abtrennt; Resultat: 16 Zellen (Fig. 17).

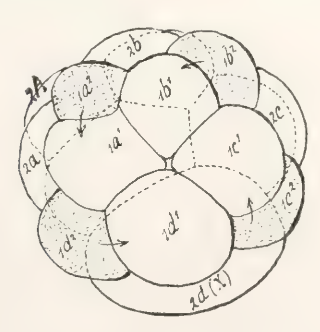


Fig. 17. Sechzehnzellen-Stadium von Arenicola cristata. Nach Child. Vom oberen (animalen) Pole gesehen. Die Grenzlinien der Micromeren sind ausgezogen, die der Macromeren punktiert. Die Ursprungszellen der Trachoblasten sind durch Punktierung gekennzeichnet.

Fünfter Teilungsschritt: Die 8 Zellen des ersten Quartetts, die 4 Zellen des zweiten Quartetts und die 4 Macromeren teilen sich gleichzeitig, wobei von letzteren das dritte Quartett produziert wird; Resultat: $(8+4+4) \times 2 = 32$ Zellen (Fig. 18a).

Der sechste Teilungsschritt wird wenigstens bei den dotterarmen Eiern von Podarke und Polygordius noch regulär durchgeführt, indem die 16 Zellen des ersten, die 8 Zellen des zweiten und die 4 Zellen des dritten Quartetts sich ungefähr gleichzeitig mit den Macromeren teilen, welch letztere nun das vierte Quartett entstehen lassen. Resultat: $(16+8+4+4) \times 2 = 64$ Zellen (Fig. 18b).

Bis zu diesem Stadium liegt der Embryo ohne äußere Bewegung in seiner Eihaut; jetzt aber hat er funktionsfähige Bewegungsorgane in Gestalt von 4×4 Wimperzellen (den sogenann-

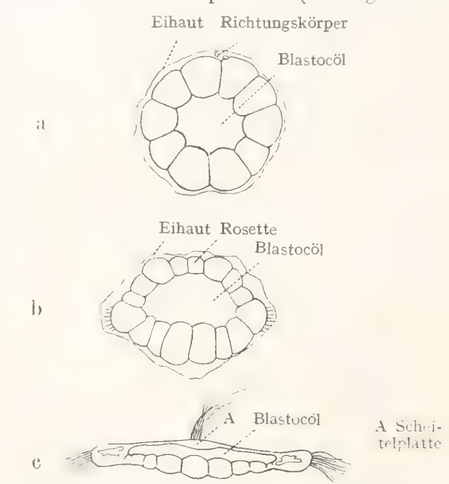


Fig. 18. Optische Längsschnitte durch Furchungsstadien von Polygordius. a 32 Zellen, b 64 Zellen, c fertige Blastula.

ten primären Trochoblasten des ersten Quartetts) erhalten. Er wird damit fähig, die Eihülle zu verlassen und das Larvenleben zu beginnen. Die eigentliche Embryonalzeit (embryonale Furchung) kann deshalb z. B. bei Polygordius nur bis zu diesem Stadium gerechnet werden. Es folgt eine zweite Periode, die der „larvalen Furchung", während welcher die junge Larve bereits frei herumschwimmt und deutliche positive Phototaxis zeigt. Zu diesen Bewegungen wird sie außer durch die Trochoblasten noch durch ein zweites larvales Organ befähigt, durch den am animalen Pol entstehenden langen Wimperschopf, der hauptsächlich als Sinnesorgan und Steuer zu dienen scheint.

Noch in 3 anderen Beziehungen markiert dieses wichtige Stadium von 64 Zellen einen Abschnitt in der Ontogenie:

Durch die Ausbildung und Vorwölbung der primären Wimperzellen prägt sich am Rande der Larve ein äquatorialer Zellring aus, durch welchen die obere, animale Zellkappe (spätere „Episphäre") scharf von der unteren, vegetativen Zellkappe (spätere „Hyposphäre" + Darmanlage) geschieden wird. Die Zellen der letzteren zeigen von jetzt an auch bei den äqual gefurchten Eiern ein größeres Volumen als die animalen Zellen (Fig. 18b). In einigen Fällen findet eine bedeutende interpolare Abplattung während des folgenden Stadiums statt (Fig. 18c).

Die Zellteilungen innerhalb der verschiedenen Quartette sowie diejenigen der Macromeren (jetzt auch Entomeren genannt) verlaufen nicht mehr synchron. Einige teilen sich überhaupt

nicht weiter (die primären Trochoblasten), die anderen teilen sich in einem sowohl für die Quartette wie für die einzelnen Quadranten verschiedenen Tempo.

Die Furchung hört auf, dem Spiraltypus zu folgen, die weiteren Teilungen gehen teils in radiärer (meridionaler) Richtung, teils in deutlich bilateralem Sinne vor sich (Fig. 23).

2c) Das Zellmosaik der fertigen Blastula. Lagerung und prospektive Bedeutung der Quartette. Durch einige weitere Teilungen, zumal auf der vegetativen Eihälfte, wird das Ende des Blastulastadiums erreicht, das z. B. bei Polygordius ein Mosaik von 112 Zellen darstellt (aus den Entomeren und aus 5 Quartetten gebildet). Diese Zellen sind in völlig gesetzmäßiger Weise auf die 4 Quadranten verteilt; ich schicke zur Orientierung voraus, daß

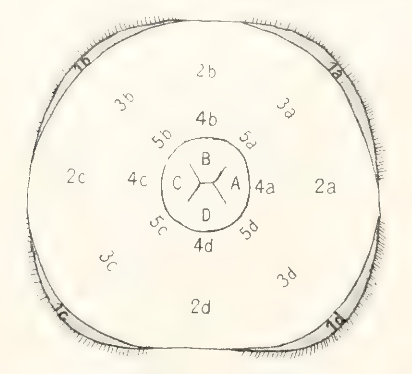


Fig. 19. Schema der Quartettverteilung auf der vegetativen Seite einer Anneliden-Blastula. A, B, C, D die Entomeren. Vgl. Figur 22.

wir sowohl auf der animalen als auf der vegetativen Blastulahälfte je 8 Radien unterscheiden müssen, die wir als die vier (median-lateralen) Hauptradien und als die vier „Interradien" („Trochoblast-"Radien) bezeichnen können. Die Verteilung der Quartette auf diese Radien geht aus beistehendem Schema hervor; wir wollen weiterhin die Anordnung der Zellen als „radial" und „interradial" unterscheiden.

Betrachten wir nun kurz den Anteil, welchen die 5 Quartette an dem Mosaik der Blastula und an der späteren Organogenese nehmen.

Das erste Quartett liefert einerseits die sämtlichen Zellen der Episphäre, andererseits in jedem Quadranten die 4 primären Trochoblasten, die interradial angeordnet sind (Fig. 20).

Die Episphärenanlage zeigt eine sehr auffällige Konfiguration, welche für die Trochophora-Entwickelung stets — auch bei den Mollusken — besonders charakteristisch ist. Es liegen nämlich am oberen Pol vier kleine streng radial orientierte Zellen, die sogenannte „Rosette", und von den Winkeln dieses vierteiligen Sternes gehen vier interradiale größere Zellen (später Zellreihen) aus, die zusammen als „Kreuz" bezeichnet werden (Fig. 20 und 21). Die vier Rosettenzellen und die vier ursprünglichen Kreuzarmzellen entstehen bei dem Teilungsschritt 32 bis 64 durch Spiralfurchung der vier „apikalen Stammzellen", deren jede einem Quadranten angehört. Zwischen den Kreuzarmen liegen die radialen „Intermediärzellen".

Die Kreuzarmzellen teilen sich später in der Richtung der Meridiane weiter (Fig. 21). Die Rosettenzellen bilden den schon erwähnten apikalen Wimperschopf aus; sie und die benachbarten Kreuzzellen entwickeln sich zu der „Schei-

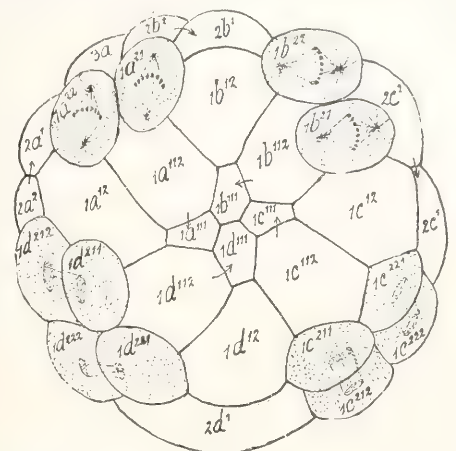


Fig. 20. Uebergang vom 32- zum 64-Zellenstadium von Arenicola cristata; vom oberen (animalen) Pole gesehen. In der Mitte die vier kleinen Zellen der „Rosette", davon ausgehend die vier „Kreuz"-Zellen $1a^{112}$, $1b^{112}$ usw. Die primären Trochoblastzellen punktiert. Nach Child.

telplatte" der Trochophora weiter. Aus der Scheitelplatte geht später der Kopfzapfen des Wurmes hervor, diese Teile des ersten Quartetts können daher als „Kopfkeim" bezeichnet werden.

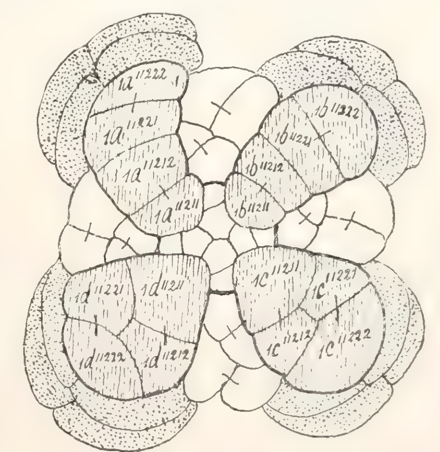


Fig. 21. Weitere Gestaltung der Rosette, des Kreuzes (gestrichelt) und der Trochoblasten bei Arenicola. Nach Child.

Die Zellen des zweiten Quartetts, am Aequator und auf der vegetativen Larvenseite radial angeordnet, füllen einerseits die Lücken

zwischen den 4 Trochoblastanlagen aus und verbinden andererseits die äquatoriale Zone mit dem vierten Quartett, das den Entomeren benachbart ist. Die Zellen dieses Quartetts erlangen besonders in dem dorsalen Quadranten (D) eine große Bedeutung, hier liefern sie nämlich entweder in ihrer Gesamtheit die „somatische Platte" (Arenicola), mindestens aber wird von der untersten, polnächsten dieser Zellen ein wesentlicher Teil des späteren „Rumpfkeimes" gebildet (Polygordius). Die Zelle 2d wird wegen dieser besonderen Aufgabe häufig als „erster Somatoblast" bezeichnet, auch wohl mit einem besonderen Buchstaben (X) belegt. Bei Polygordius haben die Abkömmlinge von 2d ein mannigfaltigeres Schicksal, sie liefern nämlich auch einige zwischen den äquatorialen Trochoblasten eingeschobene sekundäre Wimperzellen, und aus deren Schwesterzellen geht das dorsale Hyposphärenepithel hervor.

In diesen beiden Leistungen gleichen nun die 2d-Abkömmlinge hier den entsprechenden Zellen der anderen drei Quadranten; man wird nicht

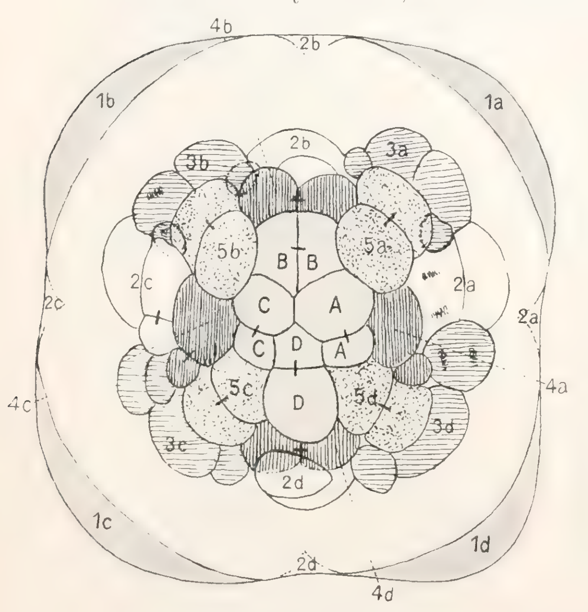


Fig. 22. Blastula von Polygordius, vegetative (untere) Seite. Die zu einem Quartett gehörigen Zellen sind durch Strichelung und Punktierung kenntlich gemacht, die Entomeren durch römische Buchstaben bezeichnet.

fehlgehen, wenn man ein derart gleichmäßiges Verhalten für ursprünglicher hält als die Spezialisierung der sämtlichen 2d-Abkömmlinge zu Rumpfbildnern.

Nur auf die unteren, d. h. nach dem vegetativen Pol zu gelegenen Zellen des zweiten Quartetts erstreckt sich die Verschiedenheit der Quadranten: in D sehen wir daraus Rumpfbildner werden; in A, B und C werden aus den entsprechenden Zellen Teile der Unterlippe und des Schlundes, also immerhin Zellbezirke, die später ebenfalls in die Organisation des Wurmes eintreten (im Gegensatz zu den auf das Larvenleben beschränkten Troch- und Hyposphärenzellen).

Das dritte Quartett nimmt in den Interradien der Hyposphäre den an die Primärtrochoblasten zunächst (nach dem unteren Pol zu) angrenzenden Raum ein. Aus der Lage dieser Zellen zur Meridianebene folgt, daß 3a und 3b, 3c und 3d sich (ebenso wie die entsprechenden Trochoblasten) spiegelbildlich gleichen; dem entspricht ihr Verhalten:

Die beiden ventral gelegenen Zellbezirke (3a und 3b) nehmen an der Mundbildung teil und liefern außerdem — durch Abspaltung winziger Furchungszellen — larvales Mesenchym (Bindegewebe).

Die beiden anderen Anlagen (3c und 3d) enthalten folgende scheinbar recht heterogene Bildungen: Unterlippe, Metatrochanlage, ventrale Hyposphäre, Wimperorgan des Rumpfkeims (aus 3d), endlich die rechte und linke Nephridienanlage. Diese kann ihrer Bildungsweise nach mit den Mesenchymkeimen verglichen werden: es sind die einzigen Furchungszellen, welche das Oberflächenmosaik verlassen und in das Blastocöl eindringen (Fig. 25).

Viertes Quartett. Viel einfacher liegen die Verhältnisse beim vierten Quartett, das wiederum eine radiale Lagerung zeigt. Auf dem Blastulastadium verbinden diese Zellen (im A-, B-, C-Quadrant je 2, im D-Quadrant 4 an Zahl) die Entomeren mit dem zweiten Quartett. In den ersteren 3 Quadranten handelt es sich um Mitteldarmzellen, aus 4d dagegen gehen die Mesoblastanlagen (Mesodermstreifen) des Wurmes hervor. Die Zellen des fünften Quartetts sind sämtlich Darmbildner; sie liegen bei der Blastula interradial zwischen den Entomeren und den Zellen des dritten Quadranten. Die Abkömmlinge von 5a und 5b bilden bei Polygordius die rechte und linke Darmwand, während die von 5c und 5d, nur mit der Entomere D zusammen, den larvalen Enddarm aufbauen. Die Entomeren endlich, d. h. die nach Abspaltung der 5 Quartette übrig bleibenden Zellen des vegetativen Pols, haben die gleiche Bestimmung; sie zeichnen sich durch eine fortan völlig bilateral-symmetrische Lagerung und Teilungsart aus, die in starkem Gegensatz zu der im typisch spiral-radiären Sinne erfolgenden Abschnürung des fünften Quartetts steht (Fig. 22).

2 d) Gastrulation. Je nach dem Gehalt des vegetativen Eipoles an Dottersubstanzen — ein Umstand, von dem wir auch äquale und inäquale Zellteilung abhängig sahen — verläuft die Gastrulation als eine typische Einstülpung (Polygordius, Podarke, Eupomatus) oder durch Umwachsung der allzu massiven Entomeren durch die Ektodermbildner (die Mehrzahl der Polychaeten). Diese sogenannte „epibolische" Gastrula ist von jener, der „Invaginations"-Gastrula offenbar abzuleiten. Wir legen daher wiederum unseren Betrachtungen die Verhältnisse der dotterarmen Eier zugrunde, welche einer Analyse am zugänglichsten sind.

Die Gastrulation beginnt damit, daß die Zellen des fünften Quartetts und die lateralen

Zellen des vierten Quartetts (4a und 4c) sich in zwei der Medianebene parallele Reihen ordnen, welche sich einander zu nähern bestrebt sind. Dabei sind wahrscheinlich chemotaktische Ursachen im Spiel, denn die Vereinigung erfolgt stets zwischen ganz bestimmten Zellen, z. B. verbindet sich 4a mit 4c, 5d mit 5c usw. Die Vereinigung ist nur dadurch möglich, daß die zwischen den sich anziehenden Zellen gelegenen Entomeren in die Tiefe rücken; dabei bilden sie eine längliche Mulde, die einen Hohlraum, das „Enterocöl" oder die Urdarmhöhlung umschließt (Fig. 23).

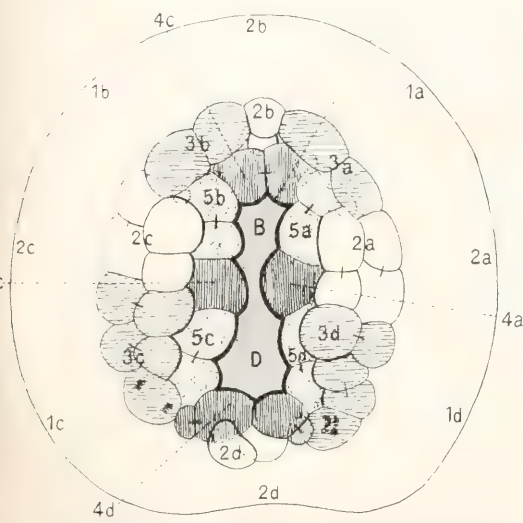


Fig. 23. Gastrulation von Polygordius. Die Zellgrenzen der peripheren Zellen und der in die Tiefe gesunkenen Entomeren sind fortgelassen.

Ehe es zur Aneinanderlagerung der Quartettzellen kommt, haben wir einen schlitzförmigen „Blastoporus" (Urmund) vor uns, aus dem nach der Vereinigung dann eine Nahtlinie, die „Blastoporus-Raphe" wird. Die Naht schließt sich zuerst nur in der Mitte des Schlitzes (Zellen 4a und 4c), so daß vorübergehend ein vorderer und ein hinterer Blastoporusrest offen bleibt.

Die hintere Oeffnung schließt sich (vorübergehend) zwischen denselben Zellen (4d, 5d und 5c), welche später dem After benachbart sind, wir können diesen Teil des Blastoporus als „Urafter" bezeichnen.

Der vordere Blastoporusrest bleibt stets geöffnet, er wird zum „Prostoma" der Larve, zur vorderen Oeffnung des Enterocöls, also später zur Verbindung zwischen Oesophagus und Magen (Fig. 24).

Der Blastoporus der Anneliden repräsentiert demnach die gesamte Ventralseite des larvalen Darms (Prostoma + Raphe + Urafter).

2e) Die „Keimblätter". Mit der Gastrulation wird die Differenzierung der „Keimblätter" entschieden; wenigstens sondern sich zu dieser Zeit das larvale Ektoderm und Entoderm sowie das larvale Mesoderm („Pädomesoblast", „Ektomesoderm") deutlich voneinander. Nur das Mesoderm des Wurmes („Entomesoderm") wird erst später als solches erkennbar. Nun ist der Begriff „Keimblatt" zwar nur in solchen Fällen unentbehrlich, wo eine Herleitung der Organanlagen von analysierten Zellterritorien nicht wie es hier geschehen konnte durchführbar ist. Im Interesse der Vergleichbarkeit mit weniger gut analysierten Fällen wollen wir aber doch zusammenstellen, was zu den „Keimblättern" der Gastrula und Trochophora gehört.

Zum „Ektoderm" wird das ganze erste und zweite Quartett, und zwar bildet das erste Quartett einerseits larvales Ektoderm (Epithel der Episphäre und primäre Wimperzellen), andererseits das imaginale Ektoderm der Kopfzapfenanlage (Scheitelplatte).

Das zweite Quartett bildet ebenfalls teils larvales Ektoderm (Hyposphäre und

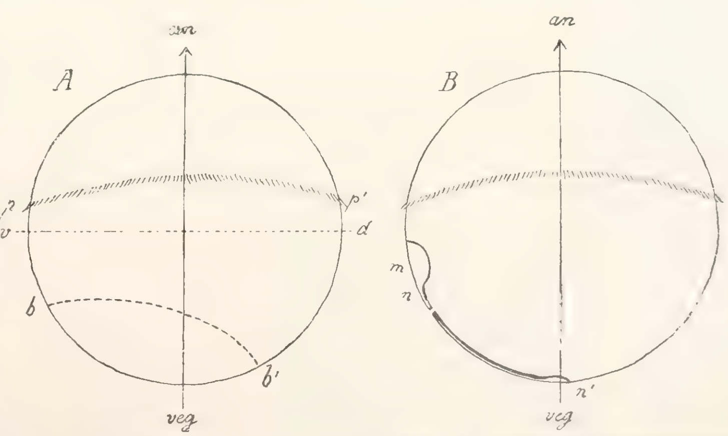


Fig. 24. Schemata des Urmundverschlusses. A mit weitem Urmund b b'. B mit größtenteils durch Ausbildung einer ventralen Blastoporus-Raphe n n' verschlossenem Urmund. m Stelle des Mundes, n vorderes Ende, n' hinteres Ende (After-Region) der Raphe. p p' Prototroch. Nach Korschelt und Heider.

sekundäre Wimperzellen) teils imaginales Ektoderm der Rumpfanlage und des Stomodaeums.

Bei der Bildung von Mund und Oesophagus spielen zunächst Abkömmlinge des dritten Quartetts eine größere Rolle, doch läßt sich (bei Polygordius) zeigen, daß der definitive Oesophagus des Wurmes ganz oder vorzugsweise aus dem zweiten Quartett hervorgeht. Auch bei dem larvalen Ektoderm der Hyposphäre ist das dritte Quartett wesentlich beteiligt, es liefert den ganzen Epithelbezirk zwischen Mund und Rumpfkeim, sowie den sekundären Wimperkranz (Metatroch).

Von besonderer Bedeutung ist die Anlage des imaginalen Ektoderms. Diese Anlage wird als „somatische Platte" oder „Rumpfkeim" bezeichnet und bei den meisten Anneliden ausschließlich auf die Zelle 2d (bei Capitella auf 2d und 4d) zurückgeführt. Bei Polygordius treten Abkömmlinge von 2d, 3d, 3c und 4d zu einem präanalen Zellkomplex zusammen, der sich um eine Wimperzelle (aus 3d) gruppiert. In dieser Zellplatte zeigt die 2d-Zelle die größte Teilungsenergie; sie scheint hauptsächlich das Bauchmark zu liefern. Von solchen Verhältnissen dürfte der sonst herrschende Modus der Rumpfanlage (ausschließlich aus 2d) abzuleiten sein.

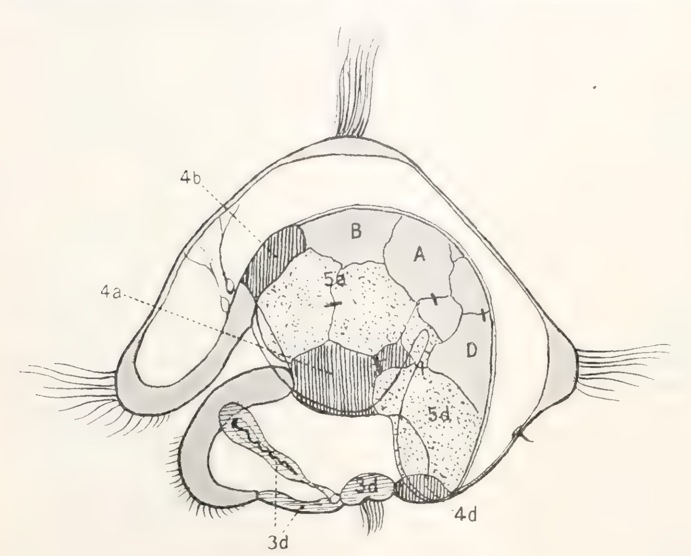


Fig. 25. Eben fertig gewordene Trochophora von Polygordius. Die Quartette und Entomeren sind wie in Fig. 22 und 23 unterschieden.

Zum Entoderm treten die Zellen des vierten und fünften Quartetts mit den Entomeren zusammen.

Das larvale Mesoderm (Mesenchym, Ektomesoderm) geht aus kleinen Zellen des dritten Quartetts (in a und b) hervor; entsprechende Zellen in c und d liefern die erste Nephridien-Anlage, die man somit auch — wenn man will — als (ekto-)mesodermal bezeichnen kann.

Das imaginale Mesoderm („Entomesoderm") geht aus zwei Abkömmlingen der Zelle 4d in der Weise hervor, daß von diesen „Telomesoblasten" sukzessive Zellmaterial nach vorn zu abgeschnürt wird, so daß je ein „Mesodermstreifen" entsteht (Fig. 16).

2f) Entstehung der Trochophora-Organe. α) Die Umwandlung der Gastrula in die junge Trochophora erfolgt bei Polygordius sehr rasch und — was die Analyse sehr erleichtert — fast ohne gleichzeitige Zellteilungen. Solche setzen erst wieder mit Energie ein, wenn die Larve Nahrung aufgenommen hat. Die wichtigste Veränderung betrifft den Verschluß der ventralen Larvenwandung über dem der Länge nach einsinkenden Darm. Dieser Verschluß erfolgt durch eine ganz ähnliche Konkreszenz, wie wir sie beim Urdarmverschluß beobachten, nur daß hier Zellen des dritten Quartetts (3c und 3d) das Sichnähern und die Verlötung vollziehen. Zu gleicher Zeit wandern die Nephridienanlagen in das Blastocöl ein, wo sie einen Stützpunkt am eben eingesunkenen Oesophagus finden (Fig. 25).

Die junge Trochophora besitzt nun folgende Organe: 1. Ein sehr dünnwandiges Epithel der Episphäre und Hyposphäre mit den stärkeren Zellen der äquatorialen Wimperkränze und des apikalen Wimperschopfs. 2. Am unteren Pol der Larve grenzt das Hyposphärenepithel an die präanale Rumpfkeimplatte an, deren Zusammensetzung wir oben kennen lernten. Sie ist in einem Wimperorgan zentriert, das dem genannten Apikalschopf der Scheitelplatte gerade gegenüberliegt. 3. Der larvale Darm läßt schon auf diesem Stadium (auch bei anderen Anneliden) seine drei Teile erkennen: den breit-schlitzförmigen Mund im Aequator der Larve, von Prototroch und Unterlippe begrenzt; den kugelförmigen Magen und den von diesem durch eine ventro-dorsal aufsteigende Klappe abgegrenzten Enddarm. Der After ist zunächst geschlossen, bricht

aber alsbald im Bereich der Zellen 4d, 5c und 5d durch; eine besondere „ektodermale Proktodäum"-Bildung kommt bei diesen primitiven Formen nicht vor; sie scheint ein sekundärer Erwerb der höheren Anneliden zu sein (vgl. Nereis Fig. 26). 4. Das Blastocöl der Larve wird durchsetzt einerseits von den kleinen Mesenchymzellen, die zunächst an der Oberseite des Stomo- häufigsten; sie stellen Einrichtungen dar, die das Schweben erleichtern sollen; hierher gehören z. B. die oben genannten sekundären Wimperkränze („telotroche" und „polytroche" Larven). Hierher gehört ferner die oft komplizierte Faltung des Prototrochs bei der „Mitraria"-Larve von Maldaniden, und hierher gehören vor allem die sogenannten provisorischen Borsten zahlreicher Poly-

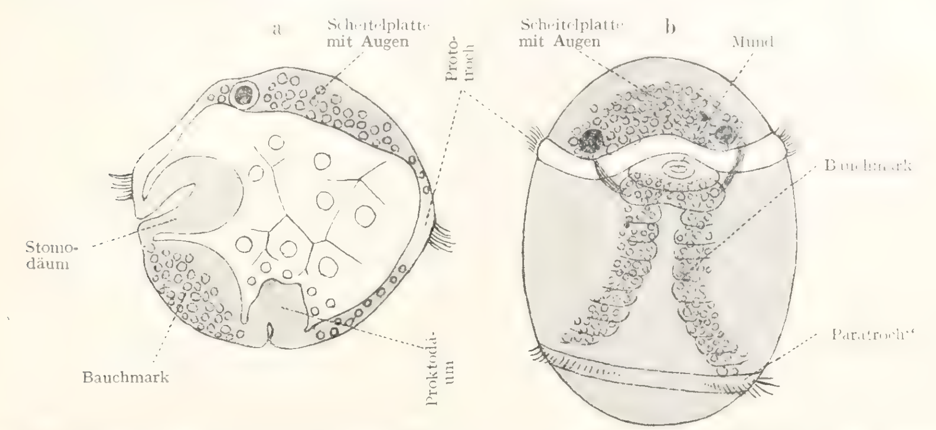


Fig. 26. Trochophora von Nereis nach Wilson und Capitella nach Eisig. Von eigentlichen Trochophora-Organen wird nur noch der Prototroch ausgebildet.

däums ansetzen, aber ihre pseudopodienartigen Fortsätze dann weiter spannen, und von den Nephridienanlagen, die auf diesem Stadium zwar nur zweizellig sind, die aber wie die Wimperung in ihrem (geschlossenen) Innern verrät, bereits lebhaft funktionieren (Fig. 25).

β) Weitere Differenzierung der larvalen Organe. Bei sehr vielen Anneliden bleiben die larvalen Organe — wenn sie überhaupt sich soweit entwickeln — auf diesem Stadium stehen. In diesen Fällen beginnt sogleich nach Beendigung der Furchungsperiode die Verdrängung der larvalen Organe durch die mächtig wuchernden Anlagen des imaginalen Kopfzapfens und Rumpfes. Häufig bleibt dabei nur der Wimperkranz als speziell larvales Organ übrig (Capitella Fig. 26); er wird bei seiner Aufgabe, den schwerer werdenden Körper zu tragen und fortzubewegen, häufig durch einen oder mehrere Wimperkränze im Bereich des Wurmrumpfes unterstützt.

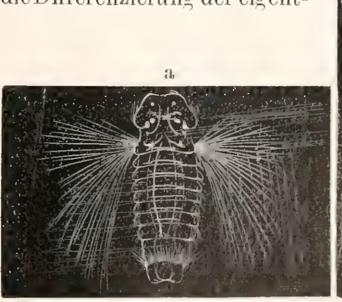
Nur bei denjenigen Formen, welche längere Zeit hindurch das pelagische Larvenleben beibehalten (Polygordius, Maldaniden, Nerine, Spio usw.) kommt es zur weiteren Differenzierung von Larvenorganen, bei denen wir aber sorgfältig zwischen ursprünglichen Trochophora-Merkmalen und sekundären Anpassungen unterscheiden müssen.

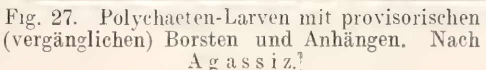
Die letztgenannten sind bei weitem am

chäten-Larven (Fig. 27). Bei solchen Larven sind oft die eigentlichen Trochophora-Organe stark zurückgebildet, die genannten Borsten-Anhänge gehören daher in der Regel den Wurmsegmenten an. Besonders merkwürdig sind zusammenklappbare Bündel von Schwebborsten, wie sie entweder an den Seiten des Rumpfes oder hinter dem After sich finden (Fig. 27a, 28).

Von diesen offensichtlich sekundären Anpassungen ist die Differenzierung der eigent-






Fig. 27. Polychaeten-Larven mit provisorischen (vergänglichen) Borsten und Anhängen. Nach Agassiz.

lichen (ursprünglichen) Trochophora-Organe zu trennen, wie sie sich bei Polygordius am deutlichsten erhalten hat. In erster Linie interessiert uns das larvale Nervensystem, bestehend aus: der Scheitelplatte nebst Wimperschopf als Zentrum, ferner aus acht radiären Nerven, die von hier aus zum Wimperapparat ziehen (ein Nervenpaar geht bis zum Rumpfkeim weiter), endlich aus diffus verzweigten Ganglienzellen des Episphären-Epithels. Der Vergleich dieser Verhältnisse mit der Organisation von Ctenophoren liegt sehr nahe und unterstützt die Vorstellung, daß die freischwimmenden Vorfahren der Ringelwürmer den heutigen Ctenophoren in mancher Beziehung ähnlich gesehen haben möchten.

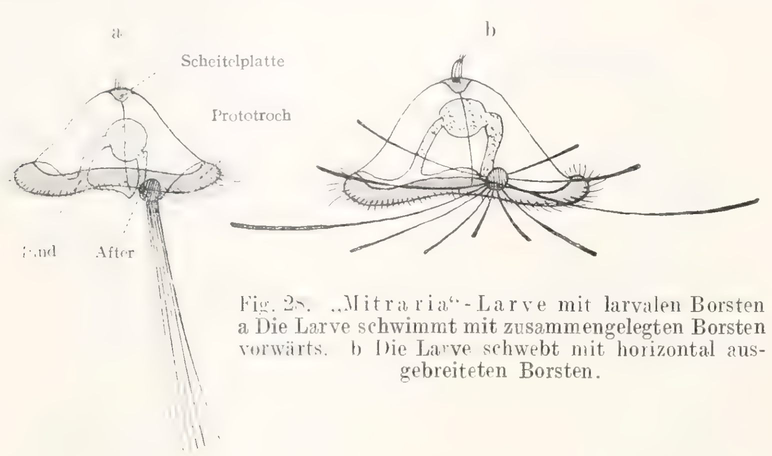


Fig. 28. „Mitraria"-Larve mit larvalen Borsten a Die Larve schwimmt mit zusammengelegten Borsten vorwärts. b Die Larve schwebt mit horizontal ausgebreiteten Borsten.

Von den übrigen larvalen Organen sei hier nur kurz aufgezählt: die komplizierte Weiterbildung der larvalen Nephridien, die Entstehung eines nicht weniger verwickelten larvalen Muskelsystems, ferner die massenhafte Entwickelung von einzelligen Drüsen im Epithel und an den Wimperkränzen.

2g) Entstehung der Wurmorgane. Für die Anneliden-Ontogenese ist charakteristisch, daß der Wurmkörper aus zwei Keimen entsteht, welche an beiden Polen der Larve sich anlegen und weiterentwickeln, und welche nur durch Verdrängung der zwischenliegenden Larventeile in Zusammenhang kommen können. Diese Verdrängung geschieht entweder allmählich, oder durch einen plötzlichen und tief eingreifenden Akt der Metamorphose. Letzteres trifft für diejenigen Formen zu, welche die eigentlichen Trochophora-Organe (Larvenblase mit Wimperreifen) für ihre pelagische Existenz gebrauchen, das erstere Verhalten finden wir bei den viel zahlreicheren Polychäten, welche entweder die pelagischen Larvenstadien zurückgedrängt haben, oder welche sekundäre Anhänge zum Schweben benützen. Als Extreme nenne ich Capitella, deren Larve infolge von Brutpflege die typischen Trochophora-Organe bis auf den Prototroch zurückgebildet hat (Fig. 26 b), auf der einen, und Polygordius auf der anderen Seite (Fig. 16, 29).

Auch hier werden wir das — am wenigsten reduzierte — Verhalten dieses Archianneliden mit Vorteil als Beispiel verwenden.

a) Anlage des Kopfzapfens (Prostomiums). Das Prostomium entsteht als eine paarige (bei Polygordius unsymmetrische) Anlage zu beiden Seiten der unpaaren mit Wimperorgan versehenen Scheitelplatte. Auch die paarige Anlage wird weiter Scheitelplatte genannt; sie enthält die Tentakeln (in eingestülptem Zustand), die Augen und die Geruchsgruben des späteren Prostomiums; wenn das larvale Epithel wenig oder gar nicht ausgebildet ist (z. B. bei Capitella), so erhält man den Eindruck,

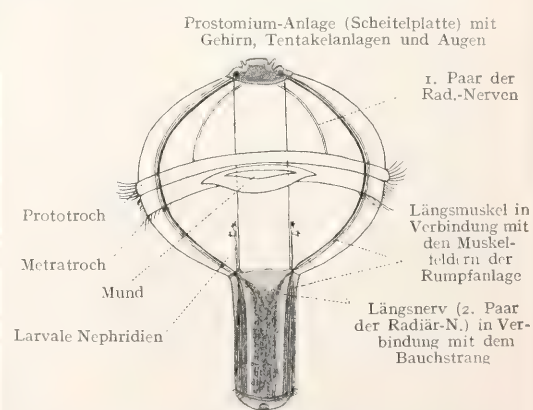


Fig. 29. Trochophora von Polygordius mit Prostomium-Anlage und Rumpf-Anlage.

als ob die ganze Episphäre sich zum Kopfzapfen entwickle (Fig. 26).

β) Anlage des Wurmrumpfes. Während bei den reduzierten Larven die Rumpfanlage (somatische Platte) zunächst an der dorsalen Fläche des Embryos (Fig. 30) sich entwickelt, sehen wir bei Polygordius die 2d-Zelle zuerst die Präanalregion aufsuchen und sich hier mit den anderen Zellen des Rumpfkeims vermehren. Erst später wird aus diesen präanalen Rumpfkeim ein perianaler Rumpfzapfen, in den sich dann der larvale Enddarm tütenförmig hineinzieht.

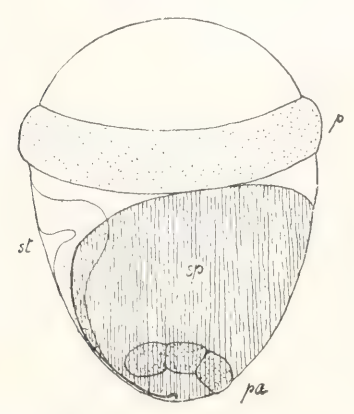


Fig. 30. Entstehung des Wurmrumpfes bei einer reduzierten Trochophora. Ansicht von der linken Seite. Schema zur Verdeutlichung der Ausbreitung und des ventralmedianen Verwachsungsprozesses der somatischen Platte. pa Paratroch, p Prototroch, sp somatische Platte, st Stomodaeum. Nach Child aus Korschelt und Heider.

Im Ektoderm dieses Zapfens ist frühzeitig die Anlage des Bauchmarks zu erkennen, welche durch zwei larvale Epithelnerven mit dem nervösen Zentrum der Prostomiumanlage (Scheitelplatte) verbunden ist. Etwas später erfolgt — bei den Borstenwürmern — die Ausbildung von Parapodien und Borsten der einzelnen Segmente. In einzelnen Fällen (Nerine, Spio usw.) werden hier provisorische Borsten als Schwebeorgane für das Larvenleben gebildet (Fig. 27).

Zwischen Ektoderm und Entoderm liegen seitlich-ventral die Mesoderm-Streifen, die großen Mesoblastzellen dem After am nächsten. In jedem Streifen ist eine metamere Gliederung zu erkennen, bald darauf auch eine Aushöhlung der einzelnen Teile, die als Ursegmente oder „Somiten" bezeichnet werden. Jedes dieser kästchenartigen Mesoderm-Segmente besteht dann aus einer inneren Wand, die dem Darm anliegt und zum „splanchnischen" Mesodermblatt wird, während das äußere, „somatische" Mesodermblatt unter dem Ektoderm liegt. Die zusammengehörigen Ursegmente der rechten und linken Anlage vereinigen sich später ventral und dorsal vom Darm; aus dieser Vereinigung entstehen die „Mesenterien" der Ventral- und Dorsalseite. (vgl. den Querschnitt Fig. 10a). Die vorderen und hinteren Grenzflächen der hintereinander liegenden Ursegmente vereinigen sich zur Bildung der Dissepimente. Im somatischen Mesodermblatt differenzieren sich die vier breiten Längsmuskeln des Wurmkörpers, welche durch bestimmte Muskeln der Larve mit der Scheitelplatte in Verbindung treten. Etwa gleichzeitig beginnen die segmentalen Nephridien sich auszubilden und die Blutgefäße sich anzulegen. Letztere entstehen in den (zweischichtigen) Mesenterien und Dissepimenten.

2h) Metamorphose. Aus der zweiteiligen Wurmanlage geht nun der Annelidenkörper dadurch hervor, daß die beiden Keime unter Ausschließung der larvalen Gewebe zur Vereinigung gelangen. Dieser Ausschluß betrifft entweder nur den Wimperreif (mangels eines Larvenepithels: Capitella) oder sie gilt außerdem für mehr oder weniger ausgedehnte Larvenepithelien. Am deutlichsten sind die Verhältnisse wiederum bei Polygordius, wo eine recht geräumige Larvenblase beseitigt werden muß. Das geschieht nach vorhergegangener Schrumpfung der Larvenblase[1]) dadurch, daß ein

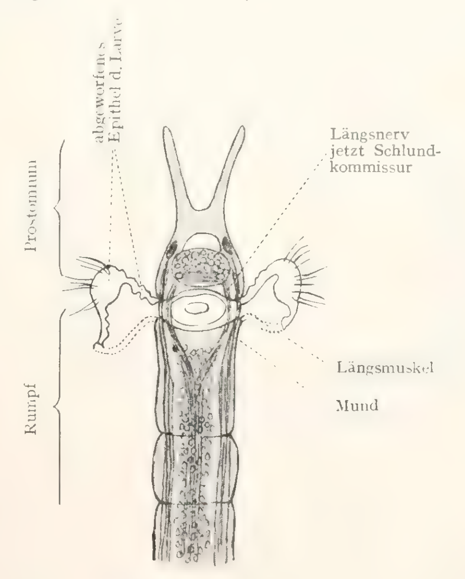


Fig. 31. Metamorphose von Polygordius.

[1]) Bei einer anderen Entwickelungsform dieser Archianneliden findet keine solche Schrumpfung statt, das Larvenepithel funktioniert bis zuletzt als eine Art Schutzhülle um die ganze (stark gefaltete) Rumpfanlage. Der metamorpho-

äquatorialer Ring von Zellen vermöge eines besonderen Mechanismus von Längs- und Ringmuskeln schließlich abgestoßen wird, worauf die Verlötung des Kopfzapfens mit dem in Umbildung begriffenen Mund und mit dem Vorderrand der Rumpfanlage erfolgt (Fig. 31).

Auch das Stomodäum und der Darm der Larve machen bei der Metamorphose tiefgreifende Veränderungen durch. Die im Blastocöl liegenden larvalen Nephridien gehen bei der Metamorphose regelmäßig verloren.

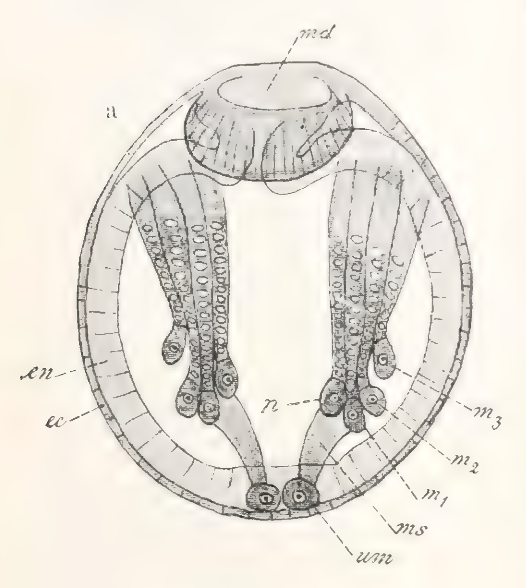
2i) Besonderheiten der direkten Entwickelung bei Oligochaeten und Hirudineen. *α*) Oligochaeten. Bei den Oligochaeten ist, da sie anstatt im Wasser sich im Innern von Kokons zu entwickeln pflegen, die Organisation der freischwimmenden Larve völlig unterdrückt mit Einschluß der Wimperkränze. Nur eine Wimperzone um den Mund herum und eine ventrale Wimperrinne (wie sie auch bei Capitella und anderen Polychaeten vorkommt) sind vorhanden. Das Blastocöl ist fast völlig verdrängt, gleichwohl kann ein Paar larvaler Nephridien vorhanden sein. Der After bleibt lange Zeit geschlossen. Die Anlage der Somiten gleicht dem oben Beschriebenen. Wie diese, so soll hier auch das Bauchmark auf „teloblastische" Weise entstehen (Fig. 32 nb). Weitere Teloblasten (jederseits drei) sind als Anlage der Ringmuskulatur beschrieben worden.

Die Anlage des Prostomiums nebst Cerebralganglion liegt von vornherein direkt über dem Munde.

Die Embryonen dieses Stadiums (Fig 32) schwimmen einige Zeit in der Dotterflüssigkeit des Kokone umher, so daß man sie als „larvenähnlich" bezeichnen kann.

β) Hirudineen. Von den Hirudineen zeigen besonders die Gnathobdelliden interessante Beziehungen zur Entwickelung der sonstigen Anneliden. Das Epithel der Larve — das in der Mundregion Bewimperung aufweist — ist ein ebenso provisorisches wie das der typischen Trochophora.

Die definitiven Anlagen des Wurmkörpers



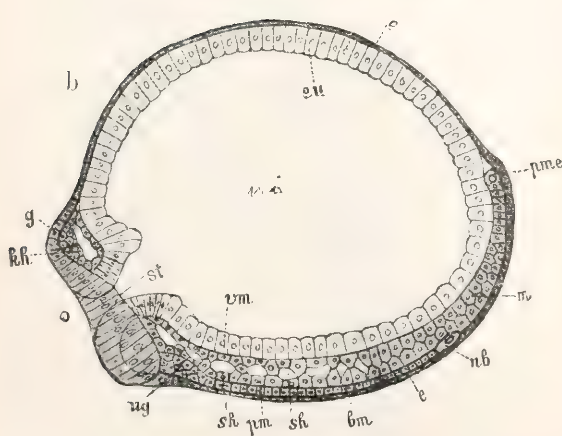


Fig. 32. Embryo von Lumbricus. Nach E. B. Wilson aus Korschelt und Heider. a Von der Ventralfläche. b Von der Seite. ec Ectoderm, en Entoderm, m_1, m_2, m_3 Teloblasten der drei äußeren Reihen (Ringmuskelanlagen), ms Mesodermstreifen, md Mund, n Neuroblasten, um Urmesodermzellen.

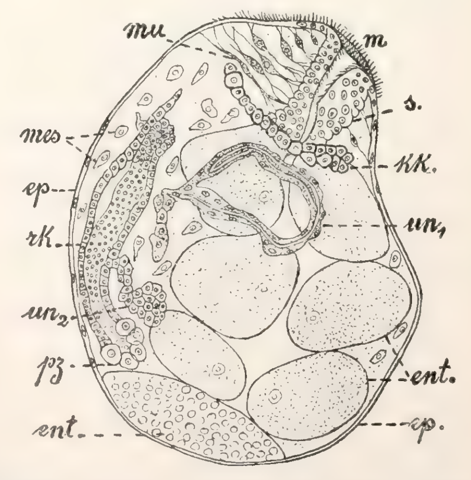


Fig. 33. Embryo eines Gnathobdelliden. Nach Bergh aus Korschelt und Heider. m Mund; kk Kopfkeim; rk Rumpfkeim.

sierte Wurm läßt dann dieses Epithel wie eine leere Hülse zurück, ähnlich wie eine Nemertine aus der „Pilidium"-Larve ausschlüpft.

sind auch hier auf einen paarigen Kopfkeim (seitlich vom Oesophagus gelegen) und ebenso paarigen Rumpfkeim (ventral gelegen) verteilt. In letzterem spielt wie bei den Oligochaeten die teloblastische Zellproduktion eine wesentliche Rolle (Fig. 33). — Es sind große larvale Nephridien vorhanden. Auch der larvale Schlund wird später durch eine Neubildung ersetzt.

3. **Systematische Uebersicht.** I. Klasse Archiannelida, Urringelwürmer. Der ganze Körper gleichmäßig gegliedert, die einzelnen Segmente äußerlich glatt, ohne Anhänge; Nervensystem in der Haut liegend. Getrenntgeschlechtlich oder zwitterig. Entwicklung durch Metamorphose. Leben im Meere.

Familie Polygordiidae. Fadenförmiger zylindrischer Körper, Kopflappen mit 2 Fühlern, Anfangsdarm mit kleinem ventralen Blindsack. Entwicklung aus der für die Annelidae typischen Trochophoralarve.

Polygordius, Chaetogordius soll an der hinteren Körperregion Borsten besitzen.

Familie Protodrilidae. Kleine zylindrische Würmer mit Wimperringen und bewimperter Bauchseite. Kopflappen mit beweglichen Fühlern. Anfangsdarm mit stark muskulösem ventralen Bulbus. Zwitterig, zuweilen mit Ersatzmännchen.

Protodrilus.

Familie Dinophilidae. Sehr kleine Würmer mit Wimperringen an den wenig zahlreichen Segmenten. Getrennt geschlechtlich. Der ganze Habitus larvenhaft.

Dinophilus.

Familie Histriobdellidae. Kleine parasitische Würmer, deren anatomischer Bau ihre systematische Stellung fraglich erscheinen läßt.

Histriobdella (Histriodrilus) homari parasitisch an den Eiern des Hummers.

II. Klasse Chaetopoda, Borstenwürmer. Mit Borsten und deutlicher metamerer Gliederung. Entwicklung mit Metamorphose.

1. Ordnung Protochaeta. Mit einfachen Parapodien, zwei beweglichen Fühlern; männliche Tiere mit segmental angeordneten Paaren von Samenblasen und Kopulationsorganen, weibliche mit ebensolchen Receptacula seminis. Befruchtung der Eier vor der Reife im Ovarium. Entwicklung mit Metamorphose.

Familie Saccocirridae. Saccocirrus papillocercus, Saccorcirrus major.

2. Ordnung Polychaeta. Mit zweiästigen oder modifizierten Parapodien und zahlreichen Borsten. Die weitaus meisten getrenntgeschlechtlich. Entwicklung mit Metamorphose. Beinahe ausschließlich im Meere lebend. Früher nach ihrer Lebensweise eingeteilt in Errantia und Sedentaria.

Familie Amphinomidae. Vollständige Parapodien mit einfachen Borsten. Meist nicht sehr zahlreiche Segmente. Der wenig deutlich begrenzte Kopflappen nach hinten verlängert und mit einer über mehrere Segmente der Rückenfläche reichenden Hautfalte, „Karunkel", verschmolzen. Mund von mehreren Segmenten umgeben.

Amphinome, Euphrosyne.

Familie Chrysopetalidae (Palmyridae). Der deutlich abgesetzte Kopflappen mit Augen und Fühleranhängen; das folgende Segment mit Fühlercirren. Auf dem Rücken der mit gleichmäßigen Anhängen ausgestatteten Segmente Paleen. Nur wenige Gattungen.

Chrysopetalum, Palmyra.

Familie Aphroditidae. Kopflappen mit Augen und Fühleranhängen, das nächste Segment oft mit Borsten und Fühlercirren. Alle Segmente oder nur die vorderen in der Weise ungleich ausgestattet, daß abwechselnd die einen Elytren tragen, die anderen nicht.

Polynoë, Lepidasthenia;

Aphrodite aculeata, Seemaus, Hermione hystrix;

Panthalis, Polyodontes;

Sigalion, Sthenelaïs.

Familie Pisionidae. Zahlreiche Segmente. Prostomium ohne Fühler, mit Augen, völlig mit dem folgenden Segment verschmolzen. Ruder mit Ausnahme der ersten am Bukkalsegment zweiästig. Der kurze Rüssel mit 2 dorsalen und 2 ventralen starken scharfzähnigen Kiefern. Nur eine Gattung:

Pisione.

Familie Nephthyidae. Körper sehr lang; der kleine Kopflappen mit 2 oder 4 Fühlern. Peristomium mit 2 Fühlercirren. Parapodien zweiästig mit Kiemen. Nur wenige Gattungen.

Nephthys.

Familie Phyllodocidae. Der gestreckte Körper meist aus zahlreichen Segmenten zusammengesetzt. Prostomium mit Fühlern und Augenflecken. Parapodien ziemlich unbedeutend, aber mit mächtig entwickelten blattförmigen Cirren.

Phyllodoce, Lopadorhynchus, pelagisch, glasartig, durchsichtig.

Eulalia, Eteone, Notophyllum.

Familie Alciopidae. Der mehr oder weniger gestreckte drehrunde Körper glashell durchsichtig. Deutlich abgesetztes Prostomium mit 2 großen halbkugeligen Linsenaugen und mit kurzen Fühlern. Ruder einästig, Cirren blattförmig.

Alciope, Asterope, beide pelagisch.

Familie Tomopteridae (Gymnocopa). Nur 18 bis 20 Segmente. Prostomium mit den 2 folgenden Segmenten zu einem hammerförmigen Kopf verschmolzen, der außer 2 Augen und 2 resp. 4 Fühlern noch 2 lange, von je einer kräftigen inneren Stützborste versteifte Fühlercirren trägt. Die zweilappigen borstenlosen Parapodien zu Ruderplatten verbreitert. Die Geschlechtsausführgänge erinnern an die der Oligochaeten. Nur eine Gattung:

Tomopteris, glashell durchsichtig, pelagisch.

Familie Typhloscolecidae. Das zugespitzte Prostomium mit 2 blattförmigen Fühlern. Rumpfsegmente mit blattartig verbreiterten Cirren. Kleine pelagische Formen. Nur wenige Arten.

Typhloscolex.

Familie Hesionidae. Der ziemlich kurze abgeplattete Körper aus wenig, meist 22 Segmenten bestehend. Prostomium mit 2 bis 3 Fühlern, bisweilen auch mit Palpen, stets mit

4 Augen. Die vordersten Segmente mit langen Fühlercirren, die Ruder der übrigen einästig oder auch mit einem kleinen oberen Ast. Borsten zusammengesetzt; Cirren langgestreckt. Meist zwitterig. Fortpflanzung häufig durch Epigamie.

Hesione, Fallacia, Podarke.

Familie Syllidae. Meist kleinere Formen mit gestrecktem, abgeplattetem, aus zahlreichen Segmenten zusammengesetztem Körper. Prostomium mit 3 Fühlern (bei männlichen Geschlechtstieren manchmal 5), und 2 Palpen sowie 4 Augen. Peristomium mit 2 oder auch nur 1 Paar Fühlercirren. Parapodien einästig, zur Zeit der Geschlechtsreife auch mit oberem Ast. Rüssel mehrteilig. Fortpflanzung einfach geschlechtlich, meist aber durch Schizogamie, Stolonenbildung, verbunden mit Generationswechsel. Nicht selten Brutpflege.

Syllis, Autolytus, Myriannida, Grubea.

Familie Ichthyotomidae. Kleine hauptsächlich auf Meeraalen (Myrus) ektoparasitisch schmarotzende, dorsoventral stark abgeplattete Würmer mit 70 bis 90 Segmenten. Mundöffnung zu einer Art Saugnapf, Kiefer zu einem zangenartigen Haftorgan umgebildet. Im übrigen den Syllidae ähnlich, die wohl die nächsten Verwandten sind, nur eine Art.

Ichthyotomus.

Familie Lycoridae (Nereidae). Der gestreckte Körper aus zahlreichen Segmenten zusammengesetzt. 2 Fühler, 2 Palpen, 4 Augen am Prostomium. 2 Paar Fühlercirren. 1 Segment ohne Parapodien. Die Ruder der übrigen Segmente ein- oder zweiästig mit zusammengesetzten Borsten. Der zweigliederige Rüssel mit 2 Kiefern und oft mit chitinösen Kieferspitzen. Vielfach Epitokie.

Nereis (Nereis dumerilii mit Generationswechsel und Dissogonie), Ceratocephale, Lycastis, Micronereis.

Familie Eunicidae. Kopflappen ohne Anhänge oder mit Fühlern und Palpen, oder auch mit Nackenwülsten, meist auch mit Augen. Die ersten 1 oder 2 Segmente ohne Parapodien, mit oder ohne Fühlercirren. Ruder ein- oder zweiästig, oft mit Kiemen. Kein ausstülpbarer Rüssel. Kieferapparat mit mehrteiligem Oberkiefer und aus 2 Platten gebildetem Unterkiefer. Vorn mündet ein blindschlauchartiger Nebendarm in den Verdauungskanal.

Eunice, Onuphis, Diopatra, Marphysa;

Halla, Lysarete;

Staurocephalus;

Lumbriconereis, Lysidice, Arabella, Ophryotrocha, Labrorostratus (parasitisch in der Leibeshöhle von Syllidae), Oligognathus bonelliae (parasitisch in der Leibeshöhle von Bonellia), Haematocleptes (parasitisch in Marphysa).

Familie Glyceridae. Der schlanke, fast drehrunde Körper aus zahlreichen äußerlich geringelten Segmenten zusammengesetzt. Prostomium lang kegelförmig mit 4 kleinen Fühlern. Parapodien ein- oder zweiästig. Weit vorstülpbarer Rüssel mit 4 kräftigen Kiefern. Blutgefäße fehlen, Leibeshöhlenflüssigkeit rot. Wenige Gattungen.

Glycera.

Familie Goniadidae. Aehnlich den vorigen, aber Parapodien im ersten Drittel des Körpers einästig, dann mit 2 getrennten Aesten. Rüssel mit 2 mehrzähnigen Hauptkiefern und mehreren (bis zu 20) kleinen Nebenkiefern. Nur wenige Gattungen.

Goniada.

Familie Sphaerodoridae. Kopf mit zahlreichen Papillen statt der Fühler. Parapodien warzenförmig mit kugelförmig aufgeblähten Cirren. Rüssel unbewaffnet. Nur ein paar Gattungen.

Ephesia.

Familie Spionidae. Kleine Würmer. Prostomium manchmal mit fühlerartigen Vorsprüngen, sonst nur mit 2 kleinen Augen. Peristomium mit 2 langen mit Papillen bedeckten und von einer Furche durchzogenen Fühlercirren. Parapodien meist zweiästig mit einfachen Borsten und fadenförmigen Kiemen. Der ausstülpbare Rüssel unbewaffnet. Leben in Röhren.

Spio, Nerine, Polydora, Magelona.

Familie Chaetopteridae. Der in mehrere, sehr verschieden aussehende Regionen geteilte Körper langgestreckt. Das meist mit 2 oder 4 sehr langen Fühlercirren versehene Peristomium trichterartig über den kleinen Kopflappen vorgeschoben. Letzterer abgestutzt oder dreilappig, oft mit Augen und kleinen Fühlern. Parapodien in den einzelnen Körperregionen besonders umgestaltet. Dorsalcirren im mittleren Rumpfabschnitt stark verbreitert und in jedem Segment dorsal verschmolzen, so daß große lappige Anhänge entstehen. In U-förmigen Röhren im Sande.

Chaetopterus, Phyllochaetopterus, Telepsavus, Spiochaetopterus.

Familie Ariciidae. Der beinahe zylindrische Körper aus zahlreichen Segmenten zusammengesetzt. Der kleine konische Kopflappen selten mit Fühlern. Parapodien zweiästig mit weit dorsal gerückten Kiemen und haarförmigen Borsten. Der kurze Rüssel unbewaffnet. Bohren im Sand.

Aricia, Scoloplos.

Familie Opheliidae. Kurze Würmer mit wenig Segmenten. Prostomium ohne Anhänge. Parapodien nur klein; fadenförmige Kiemen. Die Eier werden in mit Schleim verklebten Massen abgelegt.

Ophelia, Polyophthalmus, Ammotrypane, Travisia.

Familie Scalibregmidae. Körper nach hinten verschmälert. Das wenig abgesetzte Prostomium oft mit 2 kleinen warzenartigen Fühlern. Parapodien nur angedeutet durch jederseits 2 warzenartige Erhebungen mit 2 Stützborsten und 2 Borstenbündeln. Gewöhnlich je 1 lappenförmiger Cirrus darunter und darüber. Keine Kiemen.

Scalibregma, Lipobranchius.

Familie Telethusae (Arenicolidae). Rumpf mit Thorakal-, Abdominal- und Caudalregion. Das kleine Prostomium und das Peristomium ohne Anhänge. Die unansehnlichen Parapodien zweiästig, oben mit Haar-, unten mit Hakenborsten. Verästelte Kiemen vom 9. bis 21. Segment. Nur eine Gattung.

Arenicola marina (piscatorum) gemeiner Köderwurm.

Familie Chloraemidae (Flabelligeridae, Pherusidae). Körper kurz mit kurzen Segmenten. Der 2 lange starke gefurchte Fühler und Kiemenfäden tragende Kopflappen ist in den Vorderkörper einziehbar. Erstes oder die ersten zwei Segmente mit sehr langen nach vorn gerichteten Borsten, die den eingezogenen Kopf schützen. Parapodien zweiästig oder nur kleine Höcker. Zahlreiche schleimabsondernde Papillen in der Haut. Blut grün.

Trophonia, Stylarioides, Flabelligera, Brada.

Familie Sternaspidae. Die ersten 7 Segmente des gedrungenen, walzenförmigen Körpers sind in den übrigen Rumpf zurückziehbar. Im ganzen gegen 30 Segmente vorhanden, die ersten 3 mit je einem nur in der medianen Rücken- und Bauchlinie unterbrochenen Borstenkranz. Parapodien äußerlich kaum wahrnehmbar. Borsten hinten ganz in der Haut. Auf der Bauchseite, nahe dem Hinterende jederseits eine hornige schildförmige Platte. Jederseits vom After ein Büschel fadenförmiger Kiemen. Im 7. Segment ventral 2 fingerförmige Genitalanhänge. Darm in Windungen gelegt. Der ganze Bau erinnert an die Gephyreen. Nur eine Gattung:

Sternaspis.

Familie Cirratulidae. Die Segmente des zylindrischen Körpers einander sehr gleich. Vorderende ohne Anhänge, nur manchmal mit Fühlercirren. Die zweiästigen Parapodien sind nur papillenartige Vorwölbungen. Die Dorsalcirren einzelner oder zahlreicher Segmente zu langen fadenförmigen Kiemen umgewandelt. Leben meist in Röhren.

Cirratulus, Audouinia, Dodecaceria (mit 3 Geschlechtsformen ähnlich Nereis dumerilii), Chaetozone.

Familie Capitellidae. Kopflappen ohne Anhänge. Thorakal- und Abdominalregion deutlich zu unterscheiden, erstere mit einästigen, anhangslosen Parapodien mit einfachen Borsten; letztere mit Borstenwülsten (Tori) und einfachen oder verzweigten Kiemen. Blutgefäßsystem fehlt. Die bei beiden Geschlechtern vorhandenen Kopulationsorgane und manche andere Eigentümlichkeiten des Baues erinnern an die Oligochaeten.

Capitella, Dasybranchus, Notomastus, Mastobranchus, Clistomastus.

Familie Maldanidae (Clymenidae). An dem drehrunden Körper lassen sich 2 oder 3 nicht allzu deutlich voneinander abgesetzte Regionen unterscheiden. Das anhangslose, häufig Augenflecke tragende mit dem folgenden Segment verschmolzene Prostomium bildet oft eine Nackenplatte von konischer bis zu Scheibenform. Parapodien zweiästig, vorn der untere Ast durch einen Querwulst mit Hakenborsten (Torus) ersetzt. After meist von einem Trichter umgeben. Leben in langen Sandröhren.

Clymene, Maldane, Nicomache.

Familie Ammocharidae. Einige der vorderen Segmente sind länger als die hinteren; Borstenanordnung überall gleich. Den weiten Mund umgibt eine nur ventral fehlende Membran, die in lange mit Blutgefäßen versehene Kiemenfäden aufgefasert ist. Nur ein paar Gattungen.

Owenia, Myriochele.

Familie Ctenodrilidae. Sehr kleine Würmer ohne Parapodien mit anhangslosem oder mit einem Fühler versehenen Kopf. In den Rumpfsegmenten wenig Borsten in je 4 Büscheln. Pflanzen sich durch Teilung fort und erinnern in vielem an Oligochaeten. Systematische Stellung im übrigen zweifelhaft. [Nur wenige Arten.

Ctenodrilus.

Familie Hermellidae (Sabellariidae). Körper mit Thorax und Abdomen, das hinten in einen anhangslosen ungegliederten Schwanz übergeht. 2 große Tentakeln verdecken den Kopflappen, der unten bewegliche Cirren, oben einen Kranz von Borsten trägt, mit dem der Wurm den Eingang zu seiner Wohnröhre verschließt (Operkularborsten). Parapodien nur wulstartige Hautverdickungen. Wohnen in Sandröhren in großer Zahl beieinander. Nur wenige Gattungen.

Sabellaria, Pallasia.

Familie Amphictenidae. Der aus 20 Segmenten bestehende Körper mit Thorakal- und Abdominalregion; der umgeschlagene Schwanz rudimentär. Am ersten Segment 2 nach vorn gerichtete Kämme goldgelber Borsten (Paleen), zum Verschließen der Wohnröhre, ferner 2 Fühler. Mundsegment mit 2 Büscheln fadenförmiger Fühler. Am 2. und 3. Segment kammförmige Kiemen. Die aus Sandkörnchen zusammengeklebten, an beiden Enden offenen Wohnröhren können vom Wurm umhergetragen werden. Nur wenige Gattungen.

Pectinaria, Lagis, Petta.

Familie Ampharetidae. Oft, aber nicht bei allen jederseits von dem faden- oder kammförmige Fühler tragenden Prostomium ein Büschel starrer Borsten (Paleen). Parapodien mit warzenförmigem dorsalem und wulstartigem, Hakenborsten tragendem ventralem Ast. Die ersten 3 bis 4 borstentragenden Segmente mit je einem Paar langer fadenförmiger Kiemen. Wohnen in Schlammröhren, die viel länger als der Körper sind.

Ampharete, Amphicteis, Samytha, Melinna.

Familie Terebellidae. Der zylindrische Körper gewöhnlich vorn breiter als hinten. Das Hinterende öfters als borstenloser Anhang deutlich abgesetzt. Der flache manchmal mit Augenflecken versehene Kopflappen trägt eine Querreihe zahlreicher Tentakelfäden und bildet die Oberlippe, das Peristomium dagegen die Unterlippe. Die warzenförmigen Dorsaläste der Parapodien tragen Haarborsten, die ventralen Hakenborsten. Kiemen und damit auch die Blutgefäße fehlen bei manchen (Polycirrus); bei anderen sind bis zu 3 Paar kammförmiger und baumförmig verästelter Kiemen an den vordersten Segmenten vorhanden. Bauen Röhren aus Sand oder Muscheltrümmern.

Amphitrite, Polycirrus, Polymnia, Terebella, Lanice, Trichobranchus.

Familie Amphicorinidae. Der nur aus wenigen Segmenten bestehende Körper der kleinen Würmer trägt an den vordersten Segmenten wenige fadenförmige Kiemen. Zwitterig. Nur ein paar Gattungen.

Fabricia, Haplobranchus.

Familie Eriographidae. Körper mit Thorax

und Abdomen, letzteres mit Hakenborsten führenden Tori. Nur ein paar Gattungen.

Amphiglene, Myxicola.

Familie Sabellidae. Tentakelkrone bestehend aus einer beträchtlichen Anzahl von Fäden, die einer hufeisenförmigen Basis entspringen. Peristomium zu einem lappenförmigen Kragen umgebogen. Auf der Ventralseite des aus 9 Segmenten bestehenden Thorax drüsenreiche Bauchschilder; das Abdomen mit einer ventralen bewimperten Längsfurche (Kotrinne). Leben in Röhren im Sand oder Schlamm.

Branchiomma mit Augen an den Enden der Tentakeln, Sabella, Spirographis, Potamilla, Dasychone, Caobangia, Manayunkia, die beiden letzten im Süßwasser.

Familie Serpulidae. Prostomium mit dem in der Regel mit einem Kragen versehenen Mundsegment verschmolzen. Der Mund terminal zwischen 2 seitlichen halbkreisförmig oder spiralig eingerollten Blättern, an deren Vorderrande sich fiederförmige Tentakeln (Kopfkiemen) mit Flimmerrinne erheben. Nicht selten 1 oder 2 Tentakelfäden zu einem Verschlußdeckel (Operkulum) der Wohnröhre verdickt. Manche zwitterig. Leben in am Untergrunde festgewachsenen lederartigen oder kalkigen Röhren.

Protis, Protula, Salmacina, Apomatus, Filograna, Spirorbis, Vermilia, Psygmobranchus, Serpula, Hydroïdes, Pomatocerus.

Familie Myzostomidae. Kleine scheibenförmig abgeplattete, ektoparasitisch an Crinoiden und in Asteroiden schmarotzende Würmer mit 5 Paar Fußhöckern, die je einen Klammerhaken und 1 bis 3 Ersatzhaken tragen. Am Rande des Körpers kleine Wärzchen oder Cirren. Nach außen von den Parapodien 4 bis 6 Paar Saugnäpfe. Der mit Papillen besetzte Rüssel führt in einen verästelten Darm, der hinten mit dem weiblichen Geschlechtsausführgang in einer Kloake ausmündet. Blutgefäßsystem und Exkretionsorgane fehlen. Meist Zwitter. Zeigen in manchen anatomischen Einzelheiten eine Aehnlichkeit mit den Tardigraden, sind aber wohl sicher in Anpassung an ihre Lebensweise stark umgewandelte Polychaeten.

Myzostoma, Stelechopus.

3. Ordnung Oligochaeta. Fast stets ohne Schlundbewaffnung und immer ohne Parapodien. Keine Fühler oder Cirren. Zwitterig. Entwicklung direkt. Früher nach der Lebensweise eingeteilt in Limicolae und Terricolae.

Familie Aeolosomatidae. Die meist haarförmigen Borsten in 4 Bündeln an einem der wenigen Segmente des Körpers. Dissepimente fehlen meist vollkommen. Gehirn in dauerndem Zusammenhang mit der Haut. Schlundkommissuren und oft auch das Bauchmark fehlen. Ungeschlechtliche Vermehrung durch Teilung vorherrschend. Nur wenige Gattungen.

Aeolosoma in Süßwasser.

Familie Naididae. Kleine zarthäutige Formen mit 2 oder 4 Bündeln von je einigen Borsten an einem Segment; ventrale Bündel mit gabelspitzigen Hakenborsten, dorsale manchmal fehlend. Dissepimente wohl entwickelt. Blut farblos oder gelb. Ungeschlechtliche Vermehrung durch Teilung vorherrschend. Im Süßwasser.

Chaetogaster, Nais, Dero, Stylaria, Pristina.

Familie Tubificidae. Borsten zu mehreren in 2 ventralen und 2 dorsalen Bündeln an einem Segment; ventrale Bündel mit einfach- oder gabelspitzigen Hakenborsten. Meist im Süßwasser, z. T. im Brackwasser, am Gezeitenstrande und marin.

Tubifex, Limnodrilus, Hesperodrilus.

Familie Lumbriculidae. 8 S-förmige, einfach- oder mehr oder weniger deutlich gabelspitzige Hakenborsten in 2 ventralen und 2 dorsalen Paaren an einem Segment. Rückengefäß meist mit kontraktilen blinden Transversalgefäßen. Im Süßwasser.

Lumbriculus, Rhynchelmis.

Familie Discodrilidae. Körper in 3 Abschnitte gesondert. Hinterende zu einem muskulösen Saugnapf umgewandelt. Segmente des Mittelkörpers zweiringelig. Borsten fehlen. Schlund mit 1 dorsalen und 1 ventralen kräftigen chitinösen Kiefer. Sehr kleine hirudineenartige Würmer. Ektoparasitisch am Flußkrebs.

Branchiobdella parasita.

Familie Enchytraeidae. Kleine Würmer mit stift- oder hakenförmigen, geraden oder schwach S-förmig gebogenen einfach-spitzigen Borsten, die meist zu mehreren (3 bis 12) in fächerförmigen Bündeln stehen, selten fehlen. Blutgefäßsystem einfach. Leben in der Erde, im Süßwasser, teilweise am Gezeitenstrande.

Henlea, Lumbricillus, Enchytraeus, Fridericia, Achaeta, (Anachaeta).

Familie Alluroididae. Mit 8 S-förmig gebogenen einfach-spitzigen Hakenborsten in 2 ventralen und 2 lateralen Paaren in einem Segment. In den Sümpfen des tropischen Ost-Afrika. Nur 1 Gattung und Art:

Alluroides pordagei.

Familie Haplotaxidae. S-förmig gebogene, einfach-spitzige Hakenborsten zu 2, 4 oder 8 an einem Segment. Im Süßwasser oder in sehr feuchter Erde. Nur ein paar Gattungen.

Haplotaxis, Pelodrilus.

Familie Moniligastridae. S-förmig gebogene, einfach-spitzige Hakenborsten paarweise je 8 an einem Segment. Auf dem Lande, in Japan, den Philippinen, Sunda-Inseln, Vorder- und Hinter-Indien, Ceylon.

Moniligaster, Drawida.

Familie Megascolecidae. S-förmig gebogene, einfach-spitzige Hakenborsten zu 8 in 4 Paaren an einem Segment, oder zu vielen, die dann Ringelketten bilden. Meist in der Erde, manchmal im Süßwasser, selten am Gezeitenstrand.

Acanthodrilus, Microscolex (Photodrilus) phosphoreszierend;

Plutellus, Megascolex, Pheretima (Perichaeta);

Octochaetus, Dinodrilus;

Diplocardia;

Trigaster;

Ocnerodrilus;

Platydrilus, Notykus, Eudrilus, Eminoscolex.

Familie Glossoscolecidae. S-förmig gebogene, meist einfach-spitzige Hakenborsten zu 8 an einem Segment. Geschlechtsborsten häufig

vorhanden. Meist auf dem Lande, teilweise im Süßwasser, einige am Gezeitenstrande.

Glossoscolex, Onychochaeta;

Hermogaster;

Microchaetus, über 1 m lang, im Kapland; Kynotus;

Alma, Criodrilus.

Familie Lumbricidae. S-förmig gebogene, einfach-spitzige Hakenborsten zu 8 in regelmäßigen Längslinien an einem Segment. Rückenporen vorhanden; Geschlechtsborsten häufig. Oesophagus mit Kalkdrüsen. Meist auf dem Lande, teilweise im Süßwasser.

Eisenia, Helodrilus mit der Untergattung Allolobophora; Octalasium, Lumbricus (Lumbricus terrestris der gemeine Regenwurm).

III. Klasse Hirudinea. Blutegel. Durch sekundäre Ringelung die äußere Metamerie verwischt. Mund von einem Saugnapf umgeben; die letzten Segmente zu einer Haftscheibe umgewandelt. Ohne Parapodien und mit Ausnahme von einer Gattung stets ohne Borsten. Leibeshöhle durch die stark entwickelte Muskulatur auf ein Kanalsystem reduziert. Zwitterig.

1. Ordnung Acanthobdellea. Familie Acanthobdellidae. Der vorn zugespitzte, einer Haftscheibe entbehrende Körper mit jederseits 5 Paar Hakenborsten.

Acanthobdella pelledina in Sibirien im Süßwasser.

2. Ordnung Rhynchobdellea, Rüsselegel. Schlund einen vorstreckbaren, von einer Scheide umschlossenen Rüssel bildend.

Familie Ichthyobdellidae. Der aus einer schmaleren vorderen und einer breiteren hinteren Region zusammengesetzte Körper trägt zwei deutlich abgesetzte Saugnäpfe. Parasitisch an Fischen und anderen Wassertieren.

Branchellion, Piscicola, Cystibranchus, Pontobdella, Macrobdella.

Familie Glossosiphonidae. Der vordere Saugnapf mit dem Körper verschmolzen.

Glossosiphonia (Glossiphonia, Clepsine), Haementeria.

3. Ordnung Gnathobdellea (Arhynchobdellea) Kieferegel. Kein vorstreckbarer Rüssel; meist mit Kiefern. Eier in Kokons abgelegt.

Familie Gnathobdellidae. Schlund mit 3 bezahnten Kiefern.

Hirudo medicinalis der medizinische Blutegel, wild nur noch auf Borkum, in einem kleinen thüringer See und im Allgäu; besonders in Ungarn in Teichen künstlich gezüchtet. Haemopis (Aulastomum) gulo der Pferdeegel, nicht blutsaugend, verschlingt Würmer, Insektenlarven usw., lebt in stehenden und fliessenden Gewässern. Limnatis im Nil.

Familie Herpobdellidae. Keine bezahnten Kiefer, nur 3 chitinige Platten im Schlund. Teilweise als Landegel in den Tropen für die Reisenden unangenehm.

Herpobdella (Nephelis) in stehenden und fließenden Gewässern, Haemadipsa Landegel auf Ceylon, Xerobdella, Landegel, Oesterreich.

IV. Klasse Echiuroidea (Gephyrea chaetifera). An dem walzenförmigen Körper ist die Metamerie mehr oder weniger geschwunden. Kopflappen rüsselförmig verlängert. Vorderende stets mit 2 starken ventralen Hakenborsten. Getrennt geschlechtlich. Entwicklung mit Metamorphose. Marin.

Familie Echiuridae. Echiurus, Thalassema, Bonellia viridis, Weibchen mit sehr langem, vorn gegabeltem Kopflappen, Männchen rudimentär, sehr klein, lebt in dem Eileiter des Weibchens.

V. Klasse Sipunculoidea (Gephyrea achaeta, Inermes). Das Vorderende des walzenförmigen Körpers rüsselartig einstülpbar. Kopflappen zurückgebildet; die terminale Mundöffnung mitunter von Tentakeln umstellt. Entwicklung mit Metamorphose. Marin.

Familie Sipunculidae. Tentakeln um den Mund. Der spiralig gewundene Darm mündet dorsal aus.

Sipunculus, Aspidosiphon, Phascolion, Phascolosoma.

Familie Priapulidae. Keine Tentakeln. Der gerade gestreckte Darm mündet am Hinterende des Körpers aus. Schlund mit Papillen und Zahnreihen.

Priapulus, Halicryptus.

Zu den Gephyreen gehört wohl auch Epithetosoma norvegicum für das Shipley eine besondere Ordnung der Epithetosomatoidea aufstellt.

4. Biologie (Oekologie) und Verbreitung. Die Anneliden stammen aus dem Meere und sind auch zum weitaus größten Teil ihrem ehemaligen Element treu geblieben. Eigentlich sind es nur die Oligochaeten und die Hirudineen, die als einheitliche Gruppen das Meer verlassen haben und nun meist im Süßwasser der Seen, Teiche, Bäche und Flüsse, teilweise aber auch auf dem Lande leben; nur wenige Oligochaeten finden sich im Brackwasser oder am Meeresstrande selbst, und auch die Zahl der im Meere lebenden Hirudineen ist gering im Vergleich zu der das Süßwasser oder trockne Land bevölkernden. Dagegen sind die Archianneliden, Protochaeten, Polychaeten, Sipunculoideen und Echiuroideen vollkommen auf das Meer beschränkt, nur eine äußerst geringe Anzahl von Polychaeten hat sich dem Leben im Brackwasser und teilweise sogar dem Süßwasser angepaßt. Von diesen Süßwasser-Polychaeten gehören zwei Drittel der Familie der Lycoriden und von denen wieder die meisten der Gattung Lycastis an. Manche Arten bewohnen sowohl das Meer als auch das Brackwasser, z. B. Nereis diversicolor.

Von den verschiedenen Regionen des Meeres ist es die Strandzone, welche die meisten Vertreter der Ringelwürmer birgt. Dort, wo sich oft ein reicher Pflanzenwuchs in dem nicht sehr tiefen Wasser entwickelt, also bis zu Tiefen von 20 bis 30 m, und wo durch den Wogenanprall das anstehende Gestein des Ufers in größere und kleinere Felsblöcke

und Steine zerschlagen wird, und wo sich zwischen den Gesteinstrümmern die zerbrochenen Schalen der Mollusken zu häufen pflegen, zwischen denen sich allerlei kleines Getier verbirgt, da ist auch ein reiches Leben von Anneliden zu finden. An den Pflanzen und Steinen, in den Felsritzen, aber auch im losen Sande bauen sie ihre Wohnröhren und gehen sie dem Nahrungserwerb nach. Dabei werden die Uferzonen mit festem, hartem Gestein solchen mit weichem, sich in feinem Sand auflösendem Sandstein, der keine so bequemen Schlupfwinkel bietet, vorgezogen. Sogar in der Gezeitenzone selbst, wo der Boden des Meeres während der Ebbezeit mehr oder weniger trocken gelegt wird, leben manche dem Wechsel des Wasserstandes speziell angepaßte Polychaeten, die sich während der Flut in ihre Röhren zurückziehen, beim Niedrigwasser dagegen aus ihrem Versteck hervorkommen. Auch dort, wo der Meeresboden tiefer liegt, bis hinab zu den Tiefen von etwa 400m sind Vertreter der Anneliden nicht selten, wenn die Arten auch nicht so zahlreich sind, wie im flachen Wasser des Strandes selbst. Ja, es finden sich auch in noch größeren Tiefen bis hinab auf den Boden der Tiefsee, also bis zu mehreren Tausend Metern, einzelne Arten. Während im allgemeinen jede Art nur in einer bestimmten Tiefe vorzukommen pflegt, gibt es doch auch solche, deren Wohnbezirke sich von der flachen Küste bis in große Tiefen erstrecken.

Die meisten Polychaeten sind Bewohner des Grundes, nur wenige Familien enthalten Vertreter, die freischwimmend angetroffen werden und die sich dann meist in der Nähe der Oberfläche umhertummeln. Vor allem die Angehörigen der Alciopidae, Typhloscolecidae und Tomopteridae, auch manche Phyllodocidae sind solche pelagisch lebenden Formen, denen große plattenförmige Ruder die Fortbewegung und große Augen die Orientierung erleichtern. Auch von den bodensässigen Anneliden können manche Arten wenigstens zur Zeit der Geschlechtsreife, oft unter Umbildung zu besonders modifizierten Schwimmformen (Heteronereis-, Heterosyllis-Formen) den Grund verlassen und an die Oberfläche steigen, um dort ihre Geschlechtsprodukte zu entleeren.

Die Larven der im Meere lebenden Anneliden sind meist an eine pelagische Lebensweise angepaßt und tragen vor allem zur Verbreitung der Arten bei, indem sie diesen durch ihre Wanderungen neue Wohnplätze erschließen. Während diese Larven eine mehr oder weniger deutliche Umwandlung durchmachen, ehe sie als junge Würmer die Lebensweise der Erwachsenen aufnehmen, entwickeln sich die Nachkommen anderer Arten auf dem Grunde unter dem Schutze der Elterntiere, wobei die Metamorphose sekundär meist sehr stark reduziert erscheint. Die pelagisch lebenden Larven können zeitweilig in so großen Mengen auftreten, daß sie einen charakteristischen Bestandteil des Planktons ausmachen, z. B. die Polygordius-, Phoronis- und Mitraria-Larven.

Die Archianneliden, Protochaeten, manche Polychaeten und Süßwasser-Oligochaeten, die Hirudineen und einzelne Echiuroideen und Sipunculoideen leben frei auf dem Grunde der Gewässer und des Meeres, wo manche von ihnen sich in den Sand oder Schlamm eingraben; die meisten Chaetopoden aber bauen sich mehr oder weniger kunstvolle Wohnröhren, in denen sie hausen. In ihrer einfachsten Form stellen diese Röhren Kanäle im Bodengrund dar, deren Wände meist mit einer schleimigen Hülle bedeckt und gefestigt werden, die von Drüsen der Haut oder der Parapodien ausgeschieden wird. Nicht selten kommen diese Kanäle dadurch zustande, daß die Würmer das Material des Bodens durch die Mundöffnung in sich aufnehmen und durch den Darm passieren lassen, dessen Zellen gleichzeitig die vielfach zwischen den Sandkörnchen und Steinchen vorhandenen organischen Substanzen, Reste ehemaliger Organismen und von diesen lebende Protisten und Bakterien, als Nahrung aufnehmen. So graben sich auch die Regenwürmer auf dem Lande durch den Boden, und schon Darwin hat in seiner Arbeit „Die Bildung der Ackererde durch die Tätigkeit der Würmer" darauf hingewiesen, daß wir ihnen zum großen Teile die gleichmäßige fruchtbare Humusschicht verdanken, welche überall den Boden bedeckt. Sie verfahren dabei in der Weise, daß sie die in der Tiefe aufgenommenen unverdaulichen Sandkörnchen und Steinchen nach oben aus dem Darm entleeren, so daß diese die verwesenden Blätter und Pflanzenteile ganz bedecken und jene allmählich mehr und mehr in die Tiefe rücken. So gräbt sich im Meere z. B. auch Arenicola durch den Sand, wobei sein Wohnrevier, durch einzelne über der Bodenoberfläche entleerte Häufchen von Exkrementen gekennzeichnet wird.

Manche Polychaeten spinnen sich mit Hilfe ihrer „Spinndrüsen", die meist in den Parapodien liegen, mehr oder weniger durchsichtige Röhren, in denen sie leben und auch ihre Brut aufziehen (Nereis), andere verkleben solche Gespinnste äußerlich mit feinen Sandkörnchen (Sabellaria), oder mit Steinchen (Onuphis conchilega) oder sogar mit Fragmenten von Muschel- und Schneckenschalen (Terebella conchilega). Viele der Süßwasser-Oligochaeten, die sogenannten Tubicolen, bauen sich ebenfalls

solche Schleimröhren, die auch hier meist mit allerlei Fremdkörpern beklebt zu werden pflegen. Während diese Röhren auf dem Grunde, an Steinen oder Pflanzen festgeheftet werden und meistens cylindrisch und an beiden Enden offen sind, fertigt Pectinaria eine konische Röhre, deren hinteres enges Ende geschlossen ist, und die von dem Wurm auf seinen Wanderungen mit umhergetragen wird.

Alle solche Röhren können leicht von ihren Bewohnern verlassen werden, was bei eintretenden ungünstigen Existenzbedingungen wohl auch öfters der Fall ist. Die betreffenden Individuen suchen sich einfach bessere Wohnplätze und bauen sich neue Wohnungen. Anders verhält sich das bei den sogenannten Röhrenwürmern unter den Polychaeten. Hier sind die Röhren, welche ebenfalls auf dem Untergrund befestigt werden, teils lederartig, teils sehr hart und starr durch die Einlagerung von kohlensaurem Kalk, bei manchen Serpuliden durch einen besonderen Deckel verschließbar. Die Bewohner selbst sind in diesem Falle mit ihrem ganzen Körperbau genau an ihre Wohnröhre angepaßt, deren Herstellung sie bereits in früher Jugend begonnen haben, und die sie mit dem allmählichen Wachstum ihres Körpers auch langsam vergrößert haben. Das Material dieser Röhren wird meist durch besondere im vorderen Körperabschnitt gelegene Drüsen ausgeschieden und immerzu an dem vorderen Rande erneuert und vermehrt. So kommt es, daß diese Röhren wie die Windungen der Schneckengehäuse meist klein und dünn beginnen und dann, entsprechend dem Wachstum des Wurmes nicht nur länger werden, sondern auch einen größeren Durchmesser bekommen. Ihrer Form nach sind sie entweder gerade (Spirographis), spiralig gewunden (Spirorbis) oder unregelmäßig gebogen (Serpula); der Querschnitt ist oft rund, mitunter auch dreieckig oder sonst mehrkantig. Wenn nun auch der in einer solchen Röhre lebende Wurm sich völlig frei in ihr bewegen, sich, um Nahrung aufzunehmen, weit aus ihr vorstrecken und sich, um einem Feinde zu entgehen, in ihr hinterstes Ende zurückziehen, ja, sie sogar völlig verlassen kann, was allerdings nur im äußersten Notfall geschieht, nämlich nur wenn die chemische Beschaffenheit des umgebenden Wassers direkt schädlich wirkt oder wenn Sauerstoffmangel eintritt, so ist es ihm doch unmöglich, sich eine Röhre völlig neu zu schaffen, da er eben die Grundlage dazu, die er in seiner Jugend gelegt hatte, im Alter nicht wiederholen kann. Andererseits vermag der Wurm dann auch nicht, sich mit seinem nur für das Röhrenleben geeigneten Körper weiterzubewegen und Nahrung aufzunehmen, so daß er zugrunde gehen muß.

Gewöhnlich leben die einzelnen Individuen getrennt für sich, aber nicht selten finden sich doch größere Mengen von Vertretern einundderselben Art auf einem engen Raum beieinander, ohne daß sie sich umeinander kümmerten. Vor allem die Röhrenwürmer bauen oft ihre Wohnungen so dicht zusammen, daß fast steinartige Massen entstehen können.

Durch besondere Färbungen, von in der Haut verteilten Pigmenten herrührend, sind viele Ringelwürmer der Erscheinung ihrer Umgebung trefflich angepaßt, so daß sie auf diese Weise vor der Entdeckung durch Feinde geschützt sind. Manche dagegen zeichnen sich durch auffallende leuchtende Farben aus; Rot und Braun kommen häufig vor, ebenso Grün. Die pelagischen Alciopiden und Tomopteriden sind glasklar durchsichtig, wie so viele an der Oberfläche schwimmende Organismen. Aphrodite und Chloeia sind mit langen irisierenden Haarborsten bekleidet, welche das Tier in allen Regenbogenfarben schillern lassen. Dagegen ist die Färbung vieler anderer Anneliden unscheinbar und verdankt ihren Ursprung oft nur dem durchschimmernden Inhalt des Darmkanals. Nicht selten verleihen auch zur Zeit der Reife die durchscheinenden Geschlechtsprodukte dem Körper eine besondere Farbe.

Einzelne Ringelwürmer können in der Dunkelheit leuchten, indem sie einen phosphoreszierenden Schleim absondern. Dies ist der Fall bei Chaetopterus, manchen Polynoë-Arten, bei Polycirrus aurantiacus und anderen Polychaeten und bei dem Oligochäeten Photodrilus (Microscolex).

Während die meisten Anneliden den Tag in ihren Verstecken, unter Steinen, im Sand und Schlamm, oder in ihren Wohnröhren verbringen, wo sie nur geringe schlängelnde Bewegungen zur Erneuerung des Atemwassers ausführen, gehen sie mit Einbruch der Dämmerung auf die Nahrungssuche, sei es nun, daß sie ganz hervor kriechen oder schwimmen, oder daß sie wenigstens ihre Tentakelkronen entfalten. Dabei stellen sie jede Bewegung sofort ein, wenn etwa ein dunkler Schatten über sie hinweggleitet, und die Röhrenwürmer verschwinden blitzschnell in ihren Röhren, um erst nach einiger Zeit vorsichtig wieder hervorzukommen.

Die Nahrung der Anneliden kann sowohl pflanzlicher wie animalischer Natur sein. Viele Polychaeten, vornehmlich die früher als Rapacia zusammengefaßten, gehen auf Raub aus, wobei sie sich ihrer blitzschnell vorgestreckten oft als ansehnliche Greifzangen entwickelten Kiefer zum Fange und Festhalten der Beute bedienen. Kleine Kruster, Mollusken, Hydroiden und Schwäm-

me, aber auch andere Ringelwürmer fallen ihnen zum Opfer. Andere weniger gut bewaffnete Polychaeten nehmen pflanzliche Kost zu sich, manche hinwiederum sowohl tierische als auch vegetabilische Nahrung. Eine besondere Anpassung an ganz bestimmte Nahrung zeigen die Hirudineen, indem sie nämlich auf die Blutflüssigkeit anderer Tiere, meist kleiner Mollusken, oder auf das Blut der Fische angewiesen sind, welch letzteres sie oft an deren Kiemen sitzend (Piscicola) saugen. Am weitesten ist diese Spezialisierung bei dem medizinischen Blutegel und bei den Landegeln der heißen Länder getrieben, indem die erwachsenen Vertreter dieser Gruppe des Blutes warmblütiger Tiere bedürfen, zu dem sie durch mit ihren scharfen Kiefern geschnittene Wunden gelangen, wobei ein besonderes Sekret der Speicheldrüsen das Gerinnen verhindert. Vielleicht die meisten der Ringelwürmer begnügen sich aber mit einer weit einfacheren Kost. Wir sahen schon, wie manche den Bodengrund durchwühlen und die wenigen dort faulenden organischen Substanzen in sich aufnehmen. Andere, vor allem die Röhrenwürmer unter den Polychaeten, aber auch viele der kleinen freilebenden Formen, Archianneliden, Protochaeten, Oligochaeten, nähren sich von dem feinen organischen Detritus, der auf den Boden der Gewässer und des Meeres herabsinkt. Die Röhrenwürmer kommen zu diesem Zwecke mit dem Vorderende aus ihren Röhren hervor, entfalten ihre oft prachtvoll gefärbten Tentakelkronen und strudeln nun mit deren Wimperbesatz alle die kleinen lebenden und toten Organismen, die im umgebenden Wasser flottieren, ihrer Mundöffnung zu. Bemerkenswert ist die Art und Weise, wie Bonellia ihren zweigespaltenen Rüssel bis zu 1½ m Länge ausstrecken kann, indem sie ihn zwischen den Steinen und Pflanzen des Bodengrundes hin und her ausspannt. Die aus kleinen Organismen bestehende Nahrung wird von dem Rüssel ergriffen und in der Längsrinne desselben dem Munde zugeführt.

Verschiedene Polychaeten leben als Parasiten an oder in anderen Tieren. Acholoë astericola und Ophiodromus finden sich ektoparasitisch in den Ambulakralfurchen des Seesternes Astropecten aurantiacus. Ueberhaupt beherbergen die Echinodermen zahlreiche parasitische Polychaeten, meist Polynoë-Arten. Aber auch in der Entenmuschel Lepas anatifera, in der Ctenophore Cydippe finden sich parasitische Polychaeten. Einige Polychaeten schmarotzen in anderen Ringelwürmern, so die Eunicide Labrorostratus parasiticus in der Leibeshöhle von Odontosyllis ctenostomatus, ja die Eunicide Haematocleptes terebellides sogar in der zur gleichen Familie gehörenden Marphysa. Die Eunicide Oligognathus bonelliae lebt in Bonellia.

Auch Kommensalismus zwischen Ringelwürmern und anderen Tieren findet sich. So lebt Nereis fucata mit einem Einsiedlerkrebs zusammen in derselben Schneckenschale. Mehrfach finden sich Ringelwürmer in den Hohlräumen von lebenden Schwämmen, einige auch in den Wohnröhren anderer größerer Anneliden gemeinsam mit diesen. Ein paar Arten der Sipunculidengattung Aspidosiphon leben in Kommensalismus mit Korallen.

Die Anneliden selbst werden auch von Parasiten heimgesucht. Vor allem sind es kleine Kruster, ektoparasitisch lebende Copepoden, die besonders an den Parapodien der Polychaeten gefunden werden. Unter den Elytren der Aphroditidae oder an den Kiemen der Eunicidae siedeln sich gern Bryozoen wie Loxosoma an. Am verbreitetsten aber sind Gregarinen, die in der Leibeshöhle der Anneliden schmarotzen.

Die Bedeutung der Ringelwürmer für den Menschen ist im allgemeinen gering; nur die Regenwürmer machen eine Ausnahme, indem sie durch ihre bereits erwähnte Art der Nahrungsaufnahme das Erdreich lockern und die für die menschliche Kultur so wichtige Ackererde liefern. Abgesehen von den zur Landplage werdenden Landblutegeln der Tropen fügen die Anneliden dem Menschen und seinen Unternehmungen keinen nennenswerten Schaden zu, wie sie auch mit obiger Ausnahme selten Nutzen für ihn bedeuten. Manche Polychaeten werden gern als Köder zum Angeln benutzt, so vor allem der Fischerköderwurm Arenicola, in manchen Gegenden aber auch andere, dort gerade häufige Polychaeten oder Oligochaeten, wie Nephthys, Nereis, Lumbriciden und andere. Die zur Zeit der Geschlechtsreife auftretenden, nach Millionen von Individuen zählenden Schwärme von Eunice viridis werden von den Eingeborenen der Samoa-Inseln gefangen und geröstet, um als „Palolo" ein treffliches Mahl abzugeben, während man in Japan die dort ebenso zahlreich schwärmende Nereis japonica als Düngemittel verwendet.

Literatur. ***Audouin et Milne Edwards,*** *Classification des Annélides etc. Annal. Sciences Natur. Paris 1832 bis 34.* — ***F. E. Beddard,*** *A Monograph of the order of Oligochaeta. Oxford 1895.* — ***Derselbe,*** *Earthworms and Leeches. Cambridge Natural History 1901, Vol. 2.* — ***W. Bl. Benham,*** *Archiannelida, Polychaeta and Myzostomaria. Cambridge Natural History 1896 Vol. 2.* — ***R. S. Bergh,*** *Neue Beiträge I u. II. Zeitschr. wiss. Zool. Bd. L u. LII, 1890—1891.* — ***O. Bürger,*** *Beiträge zur Entwicklungsgeschichte der Hirudineen. Zool. Jahrb. (Ant.), Bd. IV, 1891; Zeitschr. wiss. Zool.,*

Bd. LVIII u. LXXII, 1891—1902. — **Brandes-Leuckart,** *Parasiten des Menschen (Hirudineen), 2. Aufl., 1901.* — **C. M. Child,** *The early development of Arenicola and Sternaspis. Arch. Entw. Mech., Bd. IX, 1900 [u. a. Arb.].* — **E. Claparède,** *Les Annélides chétopodes du Golfe de Naples. Genf 1868, Suppl., 1870 [u. a. Arb.].* — **E. Ehlers,** *Die Borstenwürmer. I u. II. Leipzig 1864—68 [u. a. Arb.].* — **H. Eisig,** *Monographie der Capitelliden. Fauna u. Flora d. Golfes v. Neapel 1887, Bd. 16.* — **Derselbe,** *Zur Entwickelungsgeschichte der Capitelliden Mitt. Zool. Stat. Neapel, Bd. XIII. 1898.* — **J. Fraipont,** *Le genre Polygordius. Fauna u. Flora v. Neapel 1887, Bd. 14 [u. a. Arb.].* — **K. Fuchs,** *Die Topographie des Blutgefäßsystems der Chaetopoden. Jen. Ztschr. f. Naturw. 1906, Bd. 42.* — **E. S. Goodrich,** *On the Nephridia of the Polychaeta. Quart. Journ. Mikroskop. Science, 1897—1900 u. 1895—1909.* — **Ch. Gravier,** *Sur les Annélides polychètes d'eau douce. C. R. Acad. Sc. Paris 1902, T. 135 [u. a. Arb.].* — **E. Grube,** *Die Familien der Anneliden. Arch. f. Naturgesch. 1850—51.* — **Chas. W. Hargitt,** *Experiments on the behaviour of tubicolous Annelids. Journ. exp. Zool., 1906 Vol. 3 u. 1909 Vol. 7.* — **B. Hatschek,** *Studien über die Entwicklungsgeschichte der Anneliden. Arb. Zool. Inst. Wien, Bd. I, 1878 [u. a. Arb.].* — **M. A. Hérubel,** *Recherches sur les Sipunculides. Mém. Soc. Zool. France 1908, Tome 20 [u. a. Arb.].* — **E. Korschelt,** *Ueber Bau und Entwickelung des Dinophilus apatris. Zeitschr. wiss. Zool. 1882, Bd. 37 [u. a. Arb.].* — **E. Korschelt und K. Heider,** *Lehrbuch der vergleichenden Entwickelungsgeschichte. Spezieller Teil, Heft 1, Jena 1890. Allgem. Teil, 3.—4. Lieferung, Jena 1909.* — **N. Livanow,** *Untersuchungen zur Morphologie der Hirudineen. Zool. Jahrb., Abt. Anat., 1904 bis 1907.* — **A. Malaquin,** *Recherches sur les Syllidiens. Mém. Soc. Sc. Arts. Lille 1893 [u. a. Arb.].* — **A. D. Mead,** *The early development of marine Annelids Journ. Morph. Vol. XIII, 1897 [u. a. Arb.].* — **Ed. Meyer,** *Studien über den Körperbau der Anneliden. Mitt. Zool. Stat., Neapel, 1887—1901 [u. a. Arb.].* — **W. Michaelsen,** *Oligochaeta. Tierreich 1900, 10. Lieferung [u. a. Arb.].* — **U. Pierantoni,** *Protodrilus. Fauna u. Flora. Neapel 1908, Bd. 31 [u. a. Arb.].* — **F. A. Potts,** *Methods of Reproduktion in the Syllids. Ergebnisse und Fortschritte der Zoologie, 1911, Bd. 3.* — **W. Salensky,** *Morphogenetische Studien an Würmern. I u. II Mém. Acad. St. Pétersb. Vol. XVI u. XVIII. 1905—1906 [u. a. Arb.].* — **K. E. Schreiner,** *Histologische Untersuchungen über die Augen der freilebenden marinen Borstenwürmer. Bergens Museum. Aarborg 1897.* — **A. E. Shipley,** *Gephyrea. Cambridge Natural History, 1901, Vol. 2.* — **J. W. Spengel,** *Beiträge zur Kenntnis der Gephyreen. Mitt. Zool. Stat. Neapel 1879 u. Zeitschr. wiss. Zool. 1880 [u. a. Arb.].* — **J. C. Torrey,** *The early development of Thalassema. Ann. N. York Acad., Vol. XIV, 1903, [u. a. Arb.].* — **A. L. Treadwell,** *The cytogeny of Podarke obscura Journ. Morph., Vol. XVII, 1901 [u. a. Arb.].* — **F. Vejdovsky,** *Entwickelungsgeschichtliche Untersuchungen. H. 1—4. (Oligochaeta), Prag 1883 bis 1892.* — **E. B. Wilson,** *Embryology of the Earthworn. Journ. Morph., Vol. III, 1890.* — *The Cell-Lineage of Nereis. Ibidem, Vol. VI, 1892 [u. a. Arb.].* — **R. Woltereck,** *Trochophora-Studien I. Zoologica H. XXIV, 1902.* — **Derselbe,** *Beiträge zur prakt. Analyse der Polygordius-Entwickelung. Arch. f. Entw.-Mech. Bd. XVIII, 1904.* — **Derselbe,** *Zur Kopffrage der Anneliden. Verh. d. Zool. Ges. 1905 [u. a. Arb.].*

F. Hempelmann *und* **R. Woltereck.**

Annelidae.

Paläontologie.

1. Fossilmaterial. 2. Annelidae: a) Chaetopoda: α) Conodonten; β) Polychaeta: β_1) Errantia; β_2) Tubicola; β_3) Borröhren von Tubikolen; γ) Oligochaeta. b) Hirudinea. c) Sipunculoidea. d) Lumbrikarien. e) Kriechspuren (?) von Anneliden. 3. Reste anderer Würmer. 4. Zusammenfassung.

1. Fossilmaterial. Im Vergleich mit dem, was heute in überwältigender Menge an Würmern lebt, ist das von ihnen fossil bekannte außerordentlich wenig. Wohl ist die Existenz von Würmern seit der ältesten durch Fossilüberlieferung deutbaren Zeit, seit dem Algonkium, sichergestellt, aber — da die Körper der weitaus meisten Würmer der Hartgebilde entbehren — so liegen fossil nur wenige mehr oder weniger verkalkte Kieferreste vor, fossilisierte Borsten, selten gut deutbare Abdrücke von Wurmkörpern, Wohnräumen jener Formen, die solche aus mineralischer Substanz aufzubauen vermögen, Bohrgänge und wohl auch Kriechspuren.

2. Annelidae. 2 a) Chaetopoda. Mit verschwindend wenigen Ausnahmen sind die bestimmbaren fossilen Würmer den Anneliden zuzurechnen, insbesondere den polychäten Chaetopoden, von denen namentlich die Unterordnungen der Errantia und Tubicola häufiger fossil nachgewiesen sind.

α) †Conodonten.[1]) Chr. Pander beschrieb 1851 aus dem oberkambrischen Obolussand der russischen Ostseeprovinzen und aus dem Devon und Karbon als Conodonten eine recht große Zahl sehr verschieden gestalteter winziger Gebilde: isolierte Häkchen und Zähnchen (†Drepanodus †Paltodus), zusammengesetzte „Kieferchen" mit mehr oder weniger zahlreichen kleineren und einzelnen größeren, randlich oder medialstehenden Zähnchen (†Prioniodus, †Gnathodus u. a. m.). G. J. Hinde und C. Wiman konnten die gleichen und ähnliche Formen (†Polygnathus Hinde, wie kleine Sägen) im Tremadoc (oberstes Kambrium) von Kanada und Skandinavien und im Devon der Vereinigten Staaten nachweisen. Die gelblich bis rötlich erhaltenen Zähnchen und Kieferchen aus phosphorhaltigem Kalk (und organischer Substanz) wurden vielfach als Fischzähnchen, Trilobiten-Krebs-

[1]) † vor dem Gattungs- oder Artnamen bedeutet fossile Gruppe, Gattung oder Art.

reste. als Radulazähnchen von Nacktschnecken gedeutet.

K. A. Zittel und J. V. Rohon schlossen aus der Mikrostruktur — kegelförmige, parallelgeschichtete Blätter, die von äußerst feinen, radialen Kanälchen gekreuzt sein können, bauen den



Fig. 1. †Paltodus obtusus Pander. Oberstes Kambrium, Glaukonitsand, St. Petersburg. a von der Seite, b von unten. Stark vergrößert. Aus v. Stromer.



Fig. 2. †Prioniodus radicans Hinde. Oberstes Kambrium, Chazygroup; Quebec. Kanada. 20/1. Aus v. Stromer.

Conodonten auf — die Wurmnatur der Conodonten, erkannten sie als verkalkte, kutikuläre Mund- und Oesophaguszähnchen und -kieferchen und fanden Formbeziehungen zu den Kiefern lebender Errantia: z. B. von †Scolophodus zu Eunice, Diopatra und Onuphis, von †Prioniodus und †Gnathodus zu Staurocephalus; manche Formen von †Prioniodus mit medialem größtem Zahn erinnern an Kiefer lebender Sipunculoideen z. B. von Halicryptus.

β) Polychaeta. *β*₁) Errantia.[1]) In den mittelkambrischen Burgess-Schiefertonen von Britisch-Kolumbien fand C. D. Walcott in Form von zarten, mineralisierten Häutchen eine größere Anzahl von Organismenresten, unter denen nach den 1911 veröffentlichten Beschreibungen und Abbildungen Errantia vertreten sein können, deren Einreihung in die bekannten fossilen oder lebenden Gattungen und Familien nicht wohl möglich ist. Die nach Walcott eine überraschende Menge von Strukturdetails zeigenden Gebilde werfen ein scharfes Licht auf die hohe Entfaltung des Typus der Errantia bereits zu kambrischer Zeit. Als †Aysheaia Walc. wird ein zierlicher, schlanker Wurm mit kleinem, scharf abgesetztem Kopf beschrieben, der in Intervallen von 3 Segmenten ungewöhnlich große Parapodien mit kräftigen Borsten besitzt. †Canadia Walc., eine sehr schlanke Form, trägt an den Parapodien auffallend lange Borstenbüschel. †Wiwaxia und †Pollingeria Walc. sind durch sehr große Elytren (Rückenschuppen und -stacheln) gekennzeichnet und könnten dadurch an Aphroditiden erinnern. †Worthenella Walc. ist ein sehr schlanker Wurm mit groben, langen, z. T. zweispaltigen Parapodien. †Pikaia Walc., eine schlank lanzettförmige Gestalt mit sehr deutlicher Segmentierung, trägt nur an den vorderen Segmenten feine Parapodien; am Kopf mit zwei kräftigen Tentakeln will Walcott Augen erkennen; er vergleicht die Form mit den lebenden Nephthyiden. †Miskoia Walc., von erheblicher Länge bis 0,25 m, hat eine lange retraktile Proboszis, würde darum an Gephyreen erinnern, ist aber deutlich segmentiert, hat kurze dichtstehende Parapodien, und der Mund ist von einem groben Borstenkranz umstellt.

[1]) Die Unterscheidung von Errantia und Tubicola (Röhrenwürmer S. 455) trägt der Gewohnheit der meisten Paläontologen Rechnung.

Sicherer deutbare Reste der freilebenden, marinen Errantia sind dann seit dem Unter-Silur — allerdings mit größeren Lücken im Mesozoikum und Tertiär — bekannt. G. J. Hinde, J. M. Clarke und R Etheridge beschrieben aus dem Unter- und Ober-Silur und aus dem Devon des östlichen Kanada und von New York, aus dem Ober-Silur von Gotland, England und Neu-Süd-Wales, und aus dem Unter-Karbon von Wales und Schottland eine erkleckliche Anzahl zierlicher, meist unter 2 mm langer Kieferteile, die auf Zangen, Zahnstücke und Sägeplatten, d. h. also nur auf Oberkiefer von Errantien bezogen werden konnten. Nur äußerst selten wurden solche Kieferstücke im Zusammenhang gefunden: J. M. Clarke konnte aus dem Devon von New York den Kieferapparat

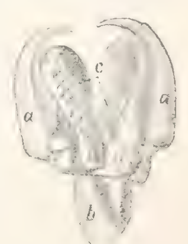


Fig. 3. †Eunicites Reidiae Hinde. Kohlenkalk (Unt. Karbon); Halkin Mount. Wales. Oberkiefer $^3/_1$ (a Zangen, b Träger, c Sägeplatten in umgekehrter Lage). Aus v. Stromer nach Hinde.

von †Arabellites mitteilen und Hinde einen besonders schönen Fund von †Eunicites aus dem Unter-Karbon von Wales. Die verschiedenen Gattungen — †Eunicites, †Staurocephalites, †Lumbriconereites, †Arabellites, †Oenonites, †Nereidavus — zugeteilten Formen sind deshalb von Bedeutung, weil sie, wie die Namen es ausdrücken, lebhaft an die Kieferbildungen lebender Euniciden anklingen, und weiter dadurch, daß die von E. Ehlers aus dem lithographischen Schiefer des oberen Jura Bayerns beschriebenen, den lebenden Gattungen Eunice und Lumbriconereis verwandten oder mindestens sehr ähnlichen Formen †Eunicites und †Lumbriconereites mit ziemlicher Sicherheit als sehr langlebige, seit dem Silur existierende Typen festgestellt werden konnten. An den recht gut erhaltenen Abdrücken von †Eu-

nicites Ehl. aus dem lithographischen Schiefer — Ehlers unterschied hier 4 Arten: †E. atavus, avitus, dentatus Ehl., proavus Germ. sp. — ist das Vorhandensein von zahlreichen groben Stütznadeln an dem langen, vielgliederigen Körper gut erkennbar. Im Kieferapparat sind hier öfters besonders gut erhalten die



Fig. 4. †Eunicites avitus Ehl. Lithographischer Schiefer. Oberer Jura; Eichstädt, Bayern. Nach Ehlers aus Zittel.

dünngestielten Schneidestücke des Unterkiefers von schiefhalbmondförmiger, konkavkonvexer Form; die Oberkieferteile sind weniger gut erkennbar. †Eunicites wurde auch im Eocän (Alttertiär) des Mte. Bolca in Ober-Italien nachgewiesen.

Aus dem lithographischen Schiefer Bayerns beschrieb Ehlers eine Amphinomide: †Meringosoma curtum Ehl. mit kurzem, breitovalem Körperumriß, glattem, mit kurzen Borsten besetztem Mittelfeld, mit gerippten Seitenfeldern, die nach hinten größer werdende Borsten tragen.

†Ctenosolex procerus Ehl. — auch aus dem lithographischen Schiefer — mag den Lycorideen oder Syllideen zugehören.

Aus dem oberen Devon von New York beschreibt J. M. Clarke gut erhaltene Abdrücke von Borstenwürmern, welche er mit Aphroditiden — †Protonympha salicifolia J. M. Cl. — und mit Phyllodociden oder auch Lycorideen — †Palaeochaeta devonica J. M. Cl. — in Verbindung bringt. Aus dem Eocän Ober-Italiens nennt Rovereto einen Aphroditidenrest †Sthenelaites.

Das Vorkommen der heute ento- und ektoparasitisch an den Armen von Antedon lebenden Myzostomiden wurde für die Vorzeit zuerst von L. v. Graff, dann von E. Engel und E. Fraas nachgewiesen. An karbonischen (†Poteriocrinus und †Actinocrinus), triadischen (†Encrinus) und jurassischen

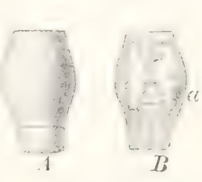


Fig. 5. Durch eine Myzostomide hervorgerufene Deformation an einem jurassischen Krinoidenstamm (†Millericrinus sp.) A Außenseite, B Längsschnitt, a Eingang zu der durch die Myzostomide erzeugte Höhlung. Aus v. Stromer nach v. Graff.

(†Apiocrinus, †Millericrinus, selten an Pentacrinus), Crinoideen sind besonders an Stielen Anschwellungen, Wucherungen und Mißgestaltungen verschiedener Art mit und ohne Stichloch beobachtet worden, die auf schmarotzende Myzostomiden zurückgeführt werden.

β_2) Tubicola (Sedentaria). In sehr großer Menge sind fossile Wohnröhren von tubikolen Polychäten bekannt.

†Selkirkia Walc. — mit kleiner, kegelförmiger, ? membranöser Wohnröhre, ? ohne Operkulum — und †Oesia Walc. — mit gebogener, großer, ? durchscheinender Röhre, entfernt an die rezenten Maldaniden erinnernd — beide aus den mittelkambrischen Burgess-Schiefertonen Britisch-Kolumbiens, sind wohl die ältesten Tubikolen, deren Wohnröhren bekannt geworden sind.

Das meiste wird gewöhnlich unter dem Namen der auch in den Meeren der Jetztzeit weltweit verbreiteten Gattung Serpula L. zusammengefaßt oder wenigstens der Familie Serpulidae zugezählt. Die am Schalenanfang geschlossenen Kalkröhren, aufgebaut aus konzentrischen dünnen Lagen, oft mit kleinen blasigen Zwischenräumen und manchmal durchzogen von feinsten Kanälchen, sind auch fossil in den allerverschiedensten Formen und auf das verschiedenste skulpturiert gefunden worden: hornförmig bis unregelmäßig gebogen (Serpula L., Protula Risso, Placostegus

Phil., Filograna Berk., Vermilia Lam., Pomatoceru s Phil.), in ebener, mehr oder weniger regelmäßiger (Rotularia Defr.) oder in Schneckenspirale eingerollt (Spirorbis Lam. e. p., Neomicrorbis Rov., ? †Burtinella Mörch e. p., ? †Tubulostium Stol.), knäuelförmig aufgewunden (Serp. †gordialis Schloth.), in Bündeln zusammengewachsen (Galeolaria Lam) u. a. m. Die Einreihung fossiler Serpeln in verschiedene Gattungen stößt auf erhebliche Schwierigkeiten [1]), da das bei fehlendem Weichkörper ausschlaggebende Moment, das Operkulum, nur höchst selten gefunden wird. Seit dem Unter-Silur sind Serpuliden aus marinen Gesteinen der Flachsee bekannt; ungemein häufig werden sie seit dem mittleren Jura. Im obersten Jura Nordwestdeutschlands, im „Serpulit", können die schlanken, leicht gebogenen Röhrchen von S. †coacervata Blumb. ganze Kalkbänke aufbauen, im oberen Cenoman Sachsens, im „Serpelsand" von Bannewitz, sind die zum Teil knäuelförmig aufgewundenen Röhren von S. †gordialis Schloth. gesteinsbildend, ebenso wie Filograna †implexa Berk, im Pliocän von Caltagirone. Die fossilen Formen liegen teils frei im Gestein, teils — und besonders häufig — werden sie an Steine oder Fremdschalen geheftet gefunden. Sehr oft liegen Serpelschalen Steinkernen auf; dann waren die Schalen der Substrattiere aus leichter löslichem Aragonit aufgebaut. Auch das seltene Vorkommen von „bohrenden", in Korallenstöcken lebenden Serpeln ist fossil bekannt geworden: S. †coralliophila Rov. im Oligocän (Tongrien) von Sassello in Ober-Italien. Der häufig in der devonischen tabulaten Koralle †Pleurodictyum problematicum Goldf. gefundene „Wurm" mag ebenfalls eine solche „bohrende" Serpel sein.

Fig. 6. Fossile tubikole Chaetopoden. a Serpula †limax Goldf. Mittlerer Jura, Franken. b und c Serpula †gordialis Schloth. Cenoman, Bannewitz, Sachsen. d Serpula †convoluta Goldf. Mittlerer Jura, Stuifen, Württemberg. e und f Serpula (Galeolaria) †socialis Goldf. Mittlerer Jura, Lahr, Baden (f vergrößert). g Serpula †septemsulcata Reich. Cenoman, Bannewitz, Sachsen. h Serpula (Rotularia) †spirula Lam. Eocän, Mti Berici, Ober-Italien. i Terebella †lapilloides Münst. Oberer Jura, Streitberg, Franken. Aus Zittel.

Den Serpeln ähnliche Kalkröhren von ihnen vermutlich verwandten Tubikolen sind aus den verschiedensten Zeiten erhalten: †Cornulites Schloth. — schlank trompetenförmige, außen mehr oder weniger regelmäßig geringelte, fein längsgestreifte Kalkröhren (Unter-Silur bis Devon); †Ortonia H. A. Nich. — kleine, leicht hornförmig gebogene, quergewulstete, mit einer Seite aufliegende und auf der Gegenseite zum Teil punktierte Röhren, (Silur, Karbon); †Conchicolites H. A. Nich. — klein, schlank,

[1]) Bei †Burtinella und †Tubulostium z. B. ist die Entscheidung, was Serpulide, was Vermetide — also Gastropod — ist, noch nicht für alle Formen getroffen.

unregelmäßig schuppig gegliedert, mit dem Schalenanfang in dichten Gruppen auf Fremdschalen sitzend (Silur); †Serpulites Murch. — bis 1/3 m lange, glatte, leicht gebogene Röhren (Silur, Karbon); †Trachyderma Phill. — wenig verkalkte (? membranöse), gebogene und gewundene, große Röhren mit schuppig lamellöser Oberfläche (Silur); †Enchostoma Mill. — schlanke, glatte, leicht gebogene Röhren (Karbon); †Torlessia Bath. aus dem Lias (?) Neuseelands, baute lange, gerade, schlanke Kalkröhren von elliptischem oder kreisrundem Querschnitte. Der an Gestein oder Pflanzen geheftet lebenden Gattung Spirorbis Lam. (Daud.) werden seit dem Silur bekannte, winzige Schälchen, in rechts oder links gewundener Spirale oder Posthornform gewachsen, zugezählt, die mit feinen Querringelungen oder mit Wärzchen und Höckerchen, auch mit Längskielen verziert sein können. Manches, wie die als brackisch oder limnisch gedeuteten Formen aus dem Karbon — Sp. (Microconchus) †carbonarius Murch. — mag richtiger der Pulmonatengattung †Palaeorbis v. Ben. und Coem. zugerechnet werden. †Autodetus G. Lindström baute Röhren in steiler Schneckenspirale (Silur, Devon). †Pyrgopolon Montf., dickschalig, öfters stumpf längsgekielt, mit im hinteren Teil eingeschlossener, glatter, schlanker Innenröhre ist aus der Oberkreide und dem Tertiär bekannt. †Ditrypa Berk., an beiden Enden offen und darum schwer von glatten Scaphopodenschalen zu trennen, existierte vielleicht schon im Devon und Karbon (R. Etheridge), dann in der Oberkreide und im Tertiär. Aus dem schwäbischen Dogger und Malm beschrieb F. A. Quenstedt freie, zierliche, leicht gebogene Röhrchen mit 4 ganz schwachen Längskielen, die in regelmäßigen Abständen geknotet sind; auch diese, †Genicularia genannten Dinge mögen den Serpeln verwandte Tubikolen sein.

Die Terebelliden, welche zum Aufbau ihrer Wohnröhren Fremdkörper verwenden, glaubt G. R. Vine mit den zu unregelmäßigen Haufen verwachsenen Röhren von †Psammosiphon V. bis ins Ober-Silur zurückverfolgen zu können. Terebella Cuv. selbst ist seit dem unteren Jura bekannt. Die Riesenform Ter. ?†magna Ortm. aus dem Miocän Patagoniens, mit einem Röhrenlumen von 12 bis 13 mm, kittet in ihre Schalen grobe Fetzen von Muscheln- und Balanus-Schalen.

Reste anderer Tubicolen sind seltener, resp. weniger sicher bestimmbar: Die Amphictenide Pectinaria auricoma Müll. wird aus Glazialablagerungen Norwegens, die Chloraemide? †Siphonostomites hesionoides Mass. sp. aus dem Eocän Ober-Italiens genannt.

β_3) Borröhren von Tubikolen. Ungemein häufig kommen besonders in paläozoischen, aber auch in jüngeren Sandsteinen, Quarziten, Schiefern und Kalken schalenlose, röhrenförmige, zumeist mit Gestein ausgefüllte Gebilde vor, die gewöhnlich als Wohnröhren von bohrenden Tubikolen bezeichnet werden. Ihre besondere Häufigkeit im unteren Kambrium Großbritanniens veranlaßte Lapworth, eine Stufe des „Annelidian“ zu unterscheiden. Eine Fülle von Namen ist solchen Dingen gegeben worden: †Scolithus Hall — vertikale, dünne Röhren; †Histioderma Kinah. — ähnlich, aber trompetenförmig erweitert; †Arenicolites Salt., †Tigillites — U-förmige Röhren mit senkrecht stehenden Schenkeln; †Planolites Hall — zylindrische flach liegende Röhren u. a. m. Daß diese Formen auf Bohrröhren von Tubikolen wie die rezenten Polydora und Dodecaceraea zurückgeführt werden können, ist durchaus wahrscheinlich. Die in jurassischen und Kreidefossilien (Molluskenschalen) vorkommenden, feinen Bohrgänge (†Talpina Hag., †Cobalia, †Hagenowia Etall., †Dendrina Quenst., †Entobia Portl.) könnten gleichfalls von Anneliden herrühren. F. A. Bather, H. Douvillé, Th. Fuchs, O. M. Reis, S. Squinabol und andere haben in jüngerer Zeit außerdem gewichtige Gründe dafür ins Feld geführt, daß auch solche Dinge, wie die meist als Problematica behandelten †Rhizocorallium — fingerdicke Wülste, häufig von U-Form, durch eine „Spreite“ verbunden, oft mit eigenartigen Netzleistchen bedeckt, besonders häufig im Muschelkalk Deutschlands — †Taonurus, dann auch †Vexillum, †Arthrophycus, †Dictyodora, und höchstwahrscheinlich vieles von den früher besonders gern als Pflanzen aufgefaßten „Fucoiden“ auf bohrende Würmer zu beziehen sei, die etwa nach Art der rezenten Chaetopteriden und Spioniden gelebt haben mögen. Natürlich sind solche Dinge, wie es in den Lehrbüchern der Paläozoologie gerne heißt, zoologisch nicht (besser nicht sicher) bestimmbar; doch als Zeugen des reichlichen Vorkommens von Anneliden behalten sie für die Biologie der Vorzeit Wert. Noch sei auf W. Deeckes Beobachtungen hingewiesen, daß Röhren wie †Scolithus auch von Gammariden — also Krebsen — erzeugt werden können, oder gar auf anorganischem Wege zustande kommen, z. B. durch Luftblasen, die feuchten Sand im Gebiet der Strandschälung durchbrechen.

γ) Oligochaeta. Von fossilen Oligochäten weiß Menge zu berichten:

Enchytraeus im samländischen Bernstein (Oligocän).

2b) Hirudinea. Die Hirudineen gehen vielleicht bis in Unter-Silur zurück: R. Rüdemann beschrieb als †Pontobdellopsis Reste aus dem Utica-Schiefer von New-York, die Hirudineen ähneln. Graf Münster, Costa, Marsh glaubten im lithographischen Schiefer des oberen Jura Hirudineen nachweisen zu können (Hirudinella, †Helminthodes); die Deutung ist höchst unsicher.

2c) Sipunculoidea (Gephyrea acheta). Walcott's überraschende Entdeckungen (1911) in den mittelkambrischen Burgess-Schiefertonen Britisch-Kolumbiens ergaben u. a. Wurmformen, die trotz deutlicher (zarter) Segmentierung mehr oder weniger ausgesprochen Sipunculoiden-Charaktere erkennen lassen. Ein Typus, †Ottoia Walc., mit walzenförmigem, parapodienlosem Körper besitzt eine kräftige, retraktile Proboszis mit papillöser (?) Oberfläche; das Vorderende ist von 5 bis 6 konzentrischen Ringen feiner Häkchen umstanden, am Hinterende steht ein Ring etwas stärkerer Häkchen. Der Darmkanal ohne (?) Spiralwindungen scheint mehr oder weniger gradlinig zu dem am Hinterende liegenden After zu führen. Man könnte danach Aehnlichkeit mit Priapuliden annehmen. Eine deutlicher segmentierte andere Form, †Banffia Walc., mit in der Mitte breit eingeschnürtem Körper wird neben †Ottoia unter Vorbehalt zu den „Gephyreen" gestellt. Walcott deutet die Möglichkeit an, daß †Ottoia und †Banffia zwischen „Chaetopoda und Hirudinea" (soll wohl heißen zwischen Gephyrea oder Sipunculoidea und Hirudinea?) vermitteln. Weder für die Begründung solcher Vermutung noch der, †Ottoia wäre etwa ein Band zwischen Chaetopoden und Sipunculoideen, liefert das erhaltene Fossilmaterial genügenden Anhalt.

Noch einmal werden fossile Sipunculoideen erwähnt: E. Ehlers sprach einzelne feingegliederte, zum Teil an der Oberfläche gekörnte Wurmreste (†Epitrachys rugosa, granulata Ehl.) aus dem lithographischen Schiefer Bayerns als hierher gehörend an.

2d) Lumbricarien. Die problematischen, als Lumbricaria Goldf. bezeichneten, zu wirren Knäueln gewundenen, langen, bis federkieldicken Schnüre mit häufig durch Fremdkörperchen gekörnter Oberfläche werden vielfach als Exkremente von Anneliden gedeutet (Goldfuß hielt sie für Nemertinen, andere sprechen sie als ausgestoßene Eingeweide von Holothurien oder Fischen an); lithogr. Schiefer, oberer Jura, Bayern.

2e) Kriechspuren? von Anneliden. Besonders häufig in paläozoischen Sedimenten (Nereitenschichten des Devon), aber auch im Jura („Zopfplatten" Quenstedts), in Kreide- und Tertiärgesteinen werden auf Schichtflächen mehr oder weniger lange, verschieden gebogene und gewundene, bandförmige, häufig zopfartig geflochten aussehende, sehr verschieden gegliederte Eindrücke und Ausfüllungen solcher gefunden. Unter den verschiedensten Namen gehen diese „Nereiten" und „Hieroglyphen": Climacichnites, Helminthoidichnites, Nereites, Nemertilites, Crossochorda, Cruziana u. v. a. m. Häufig werden diese Dinge als Abdrücke von Anneliden erklärt (Emmons, Geinitz, McLeay) oder als Fährten von solchen (Gümbel, Hall, Murchison, Nicholson, Roemer). Möglich, daß manches davon auf Bewegungsspuren von Anneliden zu beziehen sei, aber, wie Ehlers, Th. Fuchs und A. G. Nathorst zeigten, können Kriechspuren von anderen Tieren — z. B. Schnecken, Krustazeen — ganz gleiche Formen zeigen. auch Laichschnüre von Schnecken können bei ihrer Ablage ähnliche Bildungen auf dem Grunde des Wassers hervorrufen.

3. **Reste anderer Würmer.** Noch sei hier erwähnt, daß v. Heyden wie Menge Vorkommnisse von Nemathelminthen — Mermis und Anguilulla — aus dem samländischen Bernstein (Oligocän) und aus der Braunkohle von Rott am Siebengebirge (Miocän) beschrieben. Sicher über diese Dinge zu urteilen ist kaum möglich.

4. **Zusammenfassung.** Der Aufschluß, den uns die Paläontologie zur Stammesgeschichte der Würmer liefert, ist naturgemäß geringwertig. Wir können den Stamm der Würmer als einen der geologisch ältesten Tierstämme konstatieren und in ihm speziell den Unterstamm der Anneliden mit den Chaetopoden (und Sipunculoiden). Dieses Resultat steht in bestem Einklang mit der Bewertung der Anneliden von zoologischer Seite. Weiter ist zu betonen, daß durch die Paläontologie im Bereich der Anneliden keine sehr wesentlichen Umprägungen seit altpaläozoischer Zeit nachweisbar sind: Die Errantia und Tubicola wenigstens enthalten äußerst langlebige, höchst konservative Typen.

Zu Urteilen über die anderen Wurmgruppen genügt das fossile Material bei weitem nicht.

In bezug auf die Wohnbezirke lassen die überlieferten fossilen Annelidenreste durchaus nur die Zugehörigkeit zur Flachsee, zum Teil der allergrößten Strandnähe und der Strandzone selbst, erkennen.

Literatur. *Bis 1880 in* ***K. A. Zittel,*** *Handbuch der Paläontologie, Bd. 1, S. 561 bis 570, 1876 bis 1880.* — ***F. A. Bather,*** *The Mount Torlesse Annelid, Geol. Mag., Dec. V, Bd. 2, 1905.* — ***Derselbe,*** *Some fossil Annelid Burrows, Geol. Mag., Dec. V, Bd. 7, 1910.* — ***J. M. Clarke,*** *Some Devonian Worms, N.-York State Mus. Bull. 69, 1902.* — ***Derselbe,*** *Early Devonic History of N.-York a. Eastern N.-America, N.-York State Mus., Mem. 9, 1908.* — ***H. Douvillé,*** *Perfo-*

rations d'Annélides. Bull. Soc. géol. France, S. 4, Bd. 7, 1907. — **R. Etheridge Jr.,** *A. contribution to the study of the British Carboniferous tubicolar Annelids. Geol. Mag., Dec. 2, Bd. 7, 1880.* — **Derselbe,** *On the occurrence of the genus Turrilepas H. Woodw. and Annelid jaws in the Upp. Silur. rocks of N.-S.-Wales, Geol. Mag., Dec. 3, Bd. 7, 1890.* — **Th. Fuchs,** *Studien üb. Fucoiden u. Hieroglyphen, Denkschr. d. Math.-Nat. Kl. d. Akad. d. Wiss., Wien, 1895.* — **Derselbe,** *Ueb. einigen. Arbeiten z. Aufklärung d. Natur d. Alectoruriden. Mitt. d. geol. Ges. Wien, Bd. 3, 1910.* — **G. H. Girty,** *The Carbonif. Formations and Faunas of Colorado. U. S. Geol. Surv. Prof. Pap. Nr. 16, 1903.* — **L. v. Graff,** *Ueb. ein. Deformitäten an foss. Crinoiden. Paläontogr. Bd. 31, 1885.* — **G. J. Hinde,** *On Annelid remains from the Silur. Strata of the Isle of Gotland. K. Svenska. Vet. Akad. Handl. Bihang Bd. 7, 1882.* — **Derselbe,** *On the jaw-apparatus of an Annelid (Eunicites Reidiae n. sp.) from the Lower Carbonif. of Halkin Mount. Flintsh, Quart. Journ. Geol. Soc. London, Bd. 52, 1896.* — **C. J. Lisson,** *Contribucion a la Geologia de Lima y sus alrededores, Lima 1907.* — **S. A. Miller and F. E. Gurley,** *New and interesting species of palaeoz. fossils. Illin. State Mus. Nat. Hist. Bull. 7, 1895.* — **G. A. Nathorst,** *Om spår of några evertebrade djur m. m. och der palaeont. batydelse. K. Svenska Vet. Akad. Handl. Bd. 18, 1881.* — **Derselbe,** *Nouv. observations s. d. traces d'animaux . . . décr. c. algues foss. Ebendort Bd. 21, 1886.* — **O. M. Reis,** *Beobachtungen üb. Schichtenfolge und Gesteinsbild. i. d. fränk. Unt. u. Mittl. Trias (Lit. üb. Rhizocorallium u. Verwandtes). Geognost. Jahresh. Bd. 22, 1909 (1910).* — **G. Rovereto,** *Bryozoi, Annelidi e Spugne perforanti del Neog. Liguri. Paläontogr. Ital. Bd. 7, 1901.* — **Derselbe,** *Studi monografici sugli Annelidi fossili, I. Terziario. Paläontogr. Ital. Bd. 10, 1904.* — **G. R. Vine,** *Notes on the Annelida tubicola of the Wenlock shales. Quart. Journ. Geol. Soc. London, Bd. 38, 1882.* — **Ch. D. Walcott,** *Precambrian fossiliferous Formations. Bull. Geol. Soc. America, Bd. 10, 1899.* — **Derselbe,** *Middle Cambrian Annelids. Smiths. Misc. Coll. Bd. 57, 1911.* — **Zittel und J. V. Rohon,** *Ueber Conodonten. Sitzungsber. d. math.-na-turw. Cl. d. Akad. d. Wiss., München, Bd. 16, 1886 (1887).*

J. F. Pompeckj.

Anodenstrahlen.

1. Entdeckung. Allgemeine Eigenschaften. 2. Striktionsanodenstrahlen. Wirkung elektronegativer Gase. 3. Spektra und Vorkommen der Anodenstrahlen auf der Sonne. 4. A_1-Strahlen.

1. Entdeckung. Allgemeine Eigenschaften. Die Anodenstrahlen sind positive, vom positiven Pol, der „Anode", einer Geißlerschen Röhre unter gewissen Versuchsbedingungen ausgesandte, korpuskulare Strahlen. Sie wurden 1906 von Gehrcke und Reichenheim entdeckt und zuerst an glühend gemachten Anoden, die Soda und andere Salze enthielten, beobachtet. Späterhin wurden die Entstehungsbedingungen der Anodenstrahlen und ihre Darstellungsweise genauer studiert und verbessert. Sehr lichtstarke und demonstrativ wirksame Anodenstrahlen erhält man beispielsweise in folgender Röhre (Fig. 1): Die Anode A ist eine von einem Glasrohr umgebene Salzstange, die aus einem Gemisch von geschmolzenem Lithiumjodid und Kohlepulver hergestellt ist; die Kathode K ist eine Aluminiumscheibe. Die Luft in der Röhre ist hochverdünnt und enthält Joddämpfe und Wasserstoffreste. Unter diesen Umständen gehen bei Betrieb der Röhre mit einer Influenzmaschine, Hochspannungsbatterie oder mit Induktorium von der Anode A hellrot gefärbte, scharfe Strahlen aus, deren Spektrum die Lithiumlinien aufweist. Wenn man die Anode statt aus Lithiumsalzen aus Salzen anderer Metalle herstellt, so erhält man ebenfalls Anodenstrahlen, und zwar in den Farben der Spektren der betreffenden Metalle; Natriumanodenstrahlen sind gelb, Strontiumanodenstrahlen blau, Calciumanodenstrahlen violett, Thalliumanodenstrahlen grün usw. Damit man Anoden verschiedenen Materials gegeneinander auswechseln kann, pflegt man mittels eines

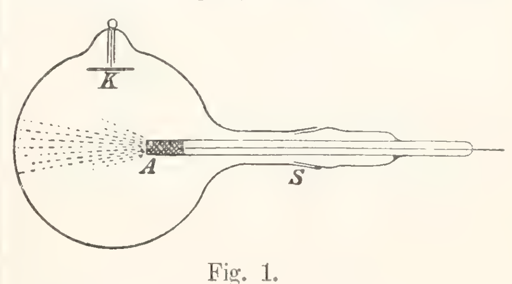


Fig. 1.

Glasschliffs S abnehmbare Anoden zu verwenden (Fig. 1).

Die Anodenstrahlen stehen senkrecht zu der Fläche der Anode, von der sie ausgehen und werfen an festen, ihnen in den Weg gestellten Körpern scharfe Schatten. Beim Auftreffen auf geeignete feste Körper erregen sie eine Phosphoreszenzfarbe. Thüringer Glas wird zu charakteristischer, gelber Phosphoreszenz erregt; das Spektrum des Phosphoreszenzlichtes enthält die D-linien des Natriums. Ein Magnet, der genügend stark ist, biegt den Anodenstrahl krumm; desgleichen lenkt ein zur Bahn des Anodenstrahls senkrechtes, elektrisches Kraftfeld, hergestellt etwa durch zwei entgegengesetzt geladene Kondensatorplatten, den Strahl ab. Die Ablenkungen geschehen im gleichen Sinne, wie bei dem Teil der von Goldstein entdeckten Kanalstrahlen (vgl. den Artikel „Kanalstrahlen"), der im Sinne positiver

Teilchen abgelenkt wird, und umgekehrt wie bei den Kathodenstrahlen. Hieraus wird geschlossen, daß die Anodenstrahlen ebenso wie die positiven Partialstrahlen der Kanalstrahlen aus schnell bewegten, positiv geladenen Teilchen bestehen. Die quantitative Ausmessung der Ablenkung ergibt auf Grund dieser Theorie die Größe der Geschwindigkeit und das Verhältnis Ladung durch Masse eines Teilchens (auch genannt spezifische Ladung). In folgender Tabelle nach Gehrcke und Reichenheim sind einige derartige Messungsergebnisse enthalten:

	Geschwindigkeit $\left(\frac{cm}{sec}\right)$	Spezifische Ladung (C.G.S.)
Lithium-A.	$2{,}7 \cdot 10^7$	$1{,}15 \cdot 10^3$
Natrium-A.	$1{,}8 \cdot 10^7$	$0{,}41 \cdot 10^3$
Strontium-A.	$1{,}1 \cdot 10^7$	$0{,}21 \cdot 10^3$

Die Potentialdifferenz zwischen der Anode und den in ihrer Nachbarschaft liegenden Partieen des Gases (der „Anodenfall") betrug hier im Durchschnitt 3600 Volt, die magnetische Feldstärke 910 Gauß.

Vergleicht man mit obigen Werten der spezifischen Ladung die für elektrolytische Jonen gefundenen Zahlen, so ergibt sich, daß die Verhältnisse der spezifischen Ladungen gleich den Verhältnissen der sogenannten Aequivalentgewichte sind. Dies gilt für alle bisher untersuchten Stoffe. Allgemein zeigt sich, daß die spezifischen Ladungen der Anodenstrahlen dieselben sind wie die der elektrolytischen Ionen. Man nimmt deshalb an, daß die Teilchen der positiven Strahlen mit den elektrolytischen Ionen identisch sind. Elektrisch neutrale Partialstrahlen, wie sie bei den Kanalstrahlen auftreten, wurden bei den Anodenstrahlen bisher nicht gefunden.

Die Anodenstrahlen zeigen ferner den von Stark an den Kanalstrahlen entdeckten Doppler-Effekt, d. h. es zeigen die von den schnellbewegten Strahlenteilchen ausgesandten Lichtwellen in der Richtung der Bewegung eine Verkürzung, entgegengesetzt der Bewegung eine Vergrößerung der Wellenlänge. Das senkrecht zur Strahlenrichtung ausgesandte Licht zeigt keine Veränderung. Man erhält hieraus auf ganz anderem Wege wie oben ebenfalls Auskunft über die Geschwindigkeit der bewegten Teilchen und kann durch Kombination dieser Beobachtung mit einer elektrischen oder magnetischen Messung auch die spezifische Ladung berechnen. Die so erhaltenen Zahlenwerte stimmen mit den auf die oben genannte Weise erhaltenen überein. Der Doppler-Effekt der Anodenstrahlen unterscheidet sich nach Reichenheim von dem der nahe verwandten Kanalstrahlen: während nämlich in den Kanalstrahlen neben der sogenannten „bewegten Intensität", d. h. den von den bewegten Teilchen emittierten Spektrallinien, auch eine „ruhende Intensität" auftritt, die von ruhenden resp. langsam bewegten Teilchen ausgesandt wird und im allgemeinen durch einen Zwischenraum von der bewegten Intensität getrennt ist, so fehlt bei den Anodenstrahlen die ruhende Intensität vielfach, wenigstens konnte sie weder bei Calcium- noch bei Strontium-Anodenstrahlen erhalten werden. Die Anodenstrahlen sind also auch in dieser Hinsicht einfacher als die Kanalstrahlen.

2. Striktionsanodenstrahlen. Wirkung elektronegativer Gase. Den Anodenstrahlen eng verwandt sind die sogenannten Striktionsanodenstrahlen. Diese entstehen nach Gehrcke und Reichenheim z. B. auf folgende Weise (vgl. Fig. 2): A und K sind zwei Aluminium-

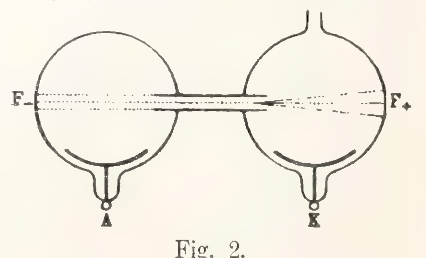


Fig. 2.

bleche, die als Elektroden dienen und sich in Glaskugeln befinden. Beide Kugeln sind durch eine Glasröhre von etwa 7 mm lichter Weite miteinander verbunden, deren Enden, wie ersichtlich, in die Kugeln hineinragen. Wenn diese Röhre evakuiert und der Strom einer 30-plattigen Influenzmaschine hindurchgeschickt wird, findet sich, sowohl mit Luft, als auch mit Wasserfüllung, daß außer dem an der Kathode entspringenden Kathodenstrahl noch ein „Striktionskathodenstrahl" vorhanden ist, der in der Verbindungsröhre beider Kugeln entspringt. Ist etwa K Kathode, A Anode, so erzeugt dieser Striktionskathodenstrahl bei F_- einen grünen Phosphoreszenzfleck auf der Glaswand. Von irgendwelchen positiven Strahlen dagegen findet sich nichts, so sehr auch das Vakuum variiert wird. Wenn jetzt aber eine Spur Jod in Form eines kleinen Bröckchens von 1 mm³ in die Röhre gebracht und diese von neuem evakuiert wird, treten plötzlich positive Striktionsstrahlen auf: nunmehr entspricht dem grünen Fluoreszenzfleck F_- der Striktionskathodenstrahlen ein gelber Fluoreszenzfleck F_+ der Striktionsanodenstrahlen, der von einem spitzkegelförmigen, rosaroten Striktionsanodenstrahl erzeugt wird.

Außer dem Jod sind auch andere Halogene imstande, die Erzeugung von Striktionsanodenstrahlen zu begünstigen, wie z. B. Dämpfe von Brom, Bromwasserstoff, Chlorwasserstoff, Jodwasserstoff. Ferner sind auch andere Gase als Luft und Wasserstoff imstande, mit Jod Striktionsanodenstrahlen zu ergeben, z. B. Sauerstoff, Helium. Reines Helium und reiner Sauerstoff — ohne Jodzusatz — zeigen keine Striktionsanodenstrahlen.

Auch von einer metallischen Anode, z. B. aus Aluminium, gehen in einem Gasgemisch, z. B. aus Wasserstoff und Jod, Anodenstrahlen aus.

Durch den Zusatz des Jods oder eines anderen Halogens wird die Potentialverteilung in der Röhre bedeutend geändert: überall, wo positive Strahlen entstehen, bildet sich ein Gebiet hohen Potentialgefälles im Gase aus. Dieses Gebiet hohen Potentialgefälles gibt vermutlich die Ursache für die Entstehung der Anodenstrahlen ab. Man denkt sich nach Gehrcke und Reichenheim den Mechanismus der Erzeugung von Anodenstrahlen etwa so: Durch den Zusatz des Jod oder eines anderen, „wirksamen" Stoffes wird die Zahl der freien negativen Elektronen im Gase verringert, da das Jod als stark elektronegatives Element die Tendenz hat, negative Elektronen zu verschlucken, also negative Ionen (Jod-Ionen) zu bilden. Die allenthalben im Gase vorhandenen, positiven Wasserstoff- und anderen Ionen werden jetzt, wo die Zahl der Elektronen verringert ist, eine starke Beschleunigung erfahren können und Anodenstrahlen bilden. Aus dieser Theorie sollte u. a. die Existenz negativer Jodstrahlen folgen. Bisher sind diese allerdings noch nicht beobachtet worden. In der Glühlampentechnik benutzt man augenscheinlich schon lange diese Eigentümlichkeit von Jod-, Phosphor-Dampf usw., hohe Fälle im Gase zu erzeugen, d. h. den Widerstand der elektrischen Leitung im luftverdünnten Raum zu erhöhen. Viele Glühlampenbirnen werden nach einem von Malignani angegebenen Verfahren evakuiert, das darin besteht, Phosphor-, Joddampf u. dgl. in die Birne vor dem Zuschmelzen einzulassen. Hierdurch muß der für die Zerstäubung des Glühfadens maßgebende und daher die Lebensdauer der Lampe schädigende Zweigstrom, der außen um den Faden herum durch das Vakuum fließt, geschwächt werden. Die Emission der Striktionsanodenstrahlen erfolgt, auch bei Betrieb der Röhre mit Gleichstrom, diskontinuierlich in regelmäßigen Pulsationen. Eine Erklärung hierfür ist nicht gegeben worden.

3. Spektra und Vorkommen der Anodenstrahlen auf der Sonne. Die Spektra der Anodenstrahlen haben deswegen ein besonderes, über die reine Physik hinausgehendes Interesse, weil sie viel Aehnlichkeit mit den in den eruptiven Protuberanzen der Sonne beobachteten Spektren haben; auch bei den Protuberanzspektren fehlt ja im allgemeinen die „ruhende Intensität" (vgl. oben Seite 464). Die große Einfachheit der Anodenstrahlspektra im Vergleich z. B. mit den Spektren des Lichtbogens legt im allgemeinen schon den Vergleich mit den einfach gebauten Spektren der Protuberanzen nahe; in den Einzelheiten wird die Gleichheit der beiden noch augenfälliger. So besteht z. B. sowohl das Spektrum der Wasserstoffanodenstrahlen als auch das der Protuberanzen lediglich aus der Balmerschen Linienserie $H\alpha$, $H\beta$, $H\gamma$ ..... Die vielen anderen, sonst noch in Wasserstoffspektren auftretenden Linien fehlen hier vollständig; das Anodenstrahlspektrum des Calciums enthält als hellste Linien das Paar 393/396, das im Sonnenspektrum als H- und K-Linien bezeichnet wird, während die in den anderen irdischen Calciumlichtquellen hellste Linie 423 sehr schwach ist. Wenn man berücksichtigt, daß die Geschwindigkeit, mit der die Protuberanzen sich fortbewegen, von der gleichen Größenordnung ist, wie die der Anodenstrahlen, so wird die Anschauung, daß die Protuberanzen nichts anderes als Anodenstrahlen sind, fast zur Gewißheit. Die Sonne oder der Sonnenkern wäre hiernach als Anode aufzufassen, und auch diese Folgerung erscheint plausibel, da die Sonne wegen ihres beständigen Verlustes an negativen Elektronen sich notwendigerweise wird positiv aufladen müssen; der Ausgleich dieser Ladungen in Form von mächtigen Gewittern in der heißen, hochverdünnten Sonnenatmosphäre hat dann das Phänomen der Anodenstrahlen zur Folge.

4. A_1-Strahlen. Unter A_1-Strahlen versteht man eine eigentümliche Art an der Anode Geißlerscher Röhren unter gewissen Umständen auftretender, positiver Strahlen, die dadurch merkwürdig sind, daß sie dem elektrischen Kraftfeld scheinbar entgegen laufen. Reichenheim fand sie 1909 bei der Suche nach negativen Massestrahlen in Jod- und anderen Dämpfen mit folgender Röhre (vgl. Fig. 3): K ist eine Aluminium-

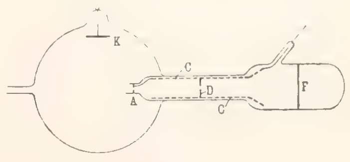


Fig. 3.

kathode, die sich in einer Glaskugel von etwa 12 cm Durchmesser befindet; in diese ragt ein Glasrohr von etwa 25 cm Durchmesser hinein, das sich an seinem Ende zu einem 1 cm langen Glasrohr von 7 mm Durchmesser verjüngt; in dieses ist als Anode ein Platinblech A eingeschmolzen, das eine schlitzförmige Oeffnung besitzt. C ist ein Zylinder aus Drahtnetz, in dessen Mitte sich ein Metalldiaphragma D befindet, das ebenfalls eine schlitzförmige Oeffnung hat, die der von A parallel steht; A, C und D waren metallisch miteinander und dem positiven Pol einer Influenzmaschine verbunden; F ist ein Fluoreszenzschirm, der aus einer mit Willemit bedeckten Glimmerplatte besteht. Ist in dem Entladungsrohr z. B. Wasserstoff und Joddampf enthalten, so tritt bei geeignetem Vakuum an der Anode A ein Anodenfall von etwa 4000 Volt auf; es gehen dann von der Anode A Anodenstrahlen in den Entladungsraum hinein; auf dem Fluoreszenzschirm F erhält man gleichzeitig einen scharf begrenzten, dem Diaphragma D entsprechenden Fluoreszenzfleck, ein Beweis dafür, daß von A auch in der Richtung zum Fluoreszenzschirm Strahlen gehen. Wenn man aus diesem Strahlenbündel mittels eines schwachen Handmagneten die negativen Anodenkanalstrahlen ablenkt, die mit den Kathodenstrahlen wesensgleich sind, so bleibt noch ein weiteres Strahlenbündel unverändert stehen.

Diese mit schwachen magnetischen Kräften unablenkbaren Strahlen wurden in starken, mittels eines Elektromagneten erzeugten Feldern untersucht; es wurde dafür gesorgt, daß die Entladung in der Kugelröhre magnetisch hinreichend geschirmt war. Es ergab sich nun, daß das Strahlenbündel aus äußerst schwer ablenkbaren, möglicherweise zum Teil ungeladenen, und zum anderen Teil verschieden stark ablenkbaren Strahlen bestand; doch waren diese Strahlen nicht, wie erwartet wurde, im Sinne negativ, sondern p o s i t i v g e l a d e n e r Teilchen ablenkbar. Ein solches Strahlenbündel zeigt demnach dieselbe Zusammensetzung wie ein Kanalstrahlenbündel.

In einer wie oben beschriebenen Entladungsröhre finden wir daher, daß von der Elektrode A, gleichgültig, ob sie Anode oder Kathode ist, die gleichen positiven Strahlen nach rückwärts ausgehen, in einem Falle die oben beschriebenen, im anderen Falle die bereits bekannten Kanalstrahlen.

Die oben beschriebenen Strahlen bilden in vielen Beziehungen ein Analogon zu den von E. G o l d s t e i n entdeckten K_1-Strahlen. Die K_1-Strahlen gehen von der Kathode in derselben Richtung wie die Kathodenstrahlen aus, man sollte daher erwarten, daß sie negativ geladen sind, sie besitzen aber, wie V i l l a r d fand, eine positive Ladung. Nach Analogie zu den K_1-Strahlen werden die obigen, von der Anode ausgehenden Strahlen A_1 - S t r a h l e n genannt.

Wenn man nicht annehmen will, daß die A_1-Strahlen, ebensowenig wie die K_1-Strahlen, einem radioaktiven Vorgang ihre Energie verdanken, so ist es nur möglich, daß sie als negative Ionen durch den Anodenfall ihre Geschwindigkeit erhalten haben, da sie sogleich hinter der Anode in einen elektrostatisch geschützten Raum kommen. Zeigen sie nachher eine positive Ladung, so müssen sie auf ihrem Wege negative Elektronen abgepalten haben. Man wird daher annehmen dürfen, daß in verdünnten Gasen Masseteilchen, die eine gewisse Geschwindigkeit haben, negative Elektronen abspalten. Im Falle der A_1-Strahlen müssen die positiv geladenen Teilchen nicht nur ein, sondern sogar zwei Elektronen abgespalten haben. Ebenso erklärt sich die Entstehung der K_1-Strahlen, über die es bisher die verschiedensten Hypothesen gab: sie erhalten als negative Ionen durch den Kathodenfall ihre Beschleunigung, spalten dann infolge ihrer Geschwindigkeit Elektronen ab und laden sich so positiv. Mit dieser Auffassung der Entstehung dieser positiven Strahlen stimmen auch neuere Versuche von W. W i e n überein, der aus einem Kanalstrahlenbündel einen neutralen Strahl magnetisch ausblendete und zeigte, daß auf seinem weiteren Wege die fliegenden, neutralen Partikelchen zum Teil wieder positive Ladung annehmen (vgl. den Artikel „K a n a l s t r a h l e n“).

Literatur. ***E. Gehrcke***, *Die Strahlen der positiven Elektrizität. Leipzig 1909. In diesem Buche sind eingehende Literaturangaben gemacht.* — ***E. Gehrcke und O. Reichenheim***, *Physikalische Zeitschrift 11 731 bis 734 1910.* — ***O. Reichenheim***, *Annalen der Physik (4)* ***33*** *747 bis 762 1910.* — ***O. Reichenheim***, *Verhandlungen D. Phys. Ges.* ***11*** *168—178 1909.*

E. Gehrcke.

Anomale Kristalle.

Dieser Ausdruck wird gewöhnlich auf das abnorme optische Verhalten der Kristalle angewendet. Es entspricht die optische Symmetrie nicht der geometrischen (siehe den Artikel „D o p p e l b r e c h u n g, a k z i d e n t e l l e“).

Anorganische Chemie.

Um das Ende des 17. Jahrhunderts klassifizierte man nach dem Vorgange von L e m e r y die Objekte der chemischen Forschung nach den drei Naturreichen in mineralische, vegetabilische und animalische. Diese Klassifikation, die sich nur auf ein

äußeres Merkmal, nämlich das natürliche Vorkommen der Substanzen gründet, mußte jedoch aufgegeben werden, als sich herausstellte, daß manche Stoffe sowohl im Pflanzen- als auch im Tierreich vorkommen. Dieser Umstand und die Erkenntnis, daß die Zusammensetzung der mineralischen Stoffe einfacheren Gesetzen unterliegt — was übrigens bereits 1669 von Becher ausgesprochen worden war, aber erst viel später, namentlich durch die Untersuchungen von Berzelius, als begründete Tatsache anerkannt wurde — führten zur Unterscheidung zwischen anorganischer und organischer Chemie. Für diese Gruppierung war weiterhin der Umstand maßgebend gewesen, daß man glaubte, einen das eigentliche Wesen der Repräsentanten beider Gruppen berührenden Unterschied gefunden zu haben, nämlich den, daß man nur die anorganischen Verbindungen künstlich aufbauen könne, die organischen dagegen nur im tierischen oder pflanzlichen Organismus unter Mitwirkung einer besonderen Lebenskraft. Diese Auffassung ist zwar bereits 1828 von Wöhler durch die Synthese des Harnstoffs widerlegt worden; dennoch hat man aus Gründen der Zweckmäßigkeit, auf die an anderer Stelle (vgl. den Artikel „Organische Chemie") näher eingegangen wird, an dieser Gruppierung festgehalten und behandelt die (organische) Chemie der Kohlenstoffverbindungen getrennt von der (anorganischen) Chemie der übrigen Elemente.

In die große Mannigfaltigkeit der anorganischen Chemie hat man dadurch Ordnung zu bringen versucht, daß man die verschiedenen Elemente nach ihrem äußeren Verhalten in Metalle und Nichtmetalle gruppierte. Eine vollkommenere Systematik ist erst im Jahre 1864 durch das gleichzeitig von dem Engländer Newlands und dem Deutschen Lothar Meyer aufgestellte periodische System (vgl. den Art. „Chemische Elemente") erreicht worden, das auf einen Zusammenhang zwischen den Atomgewichten und den sonstigen Eigenschaften der Elemente und ihrer Verbindungen gegründet ist.

Ueber die Bezeichnung anorganischer Verbindungen vgl. den Artikel „Nomenklatur".

Literatur. *H. Kopp, Die Entwicklung der Chemie, München. — E. von Meyer, Geschichte der Chemie von den ältesten Zeiten bis zur Gegenwart, 4. Auflage, Leipzig 1905. — H. Bauer, Geschichte der Chemie 1905, Sammlung Göschen, Bd. 264, 265.*

W. Böttger.

Anthracengruppe.

1. Formel und Konstitution der Stammsubstanz. 2. Anthracen: Darstellung, Eigenschaften. Nachweis und Synthesen. 3. Homologe, Halogenderivate, Sulfosäuren, Carbonsäuren, Nitroanthracen und Anthramin. 4. Oxyanthracene. 5. Anthrachinon: Darstellung, Eigenschaften, Konstitution. 6. Sulfosäuren, Nitro- und Aminoanthrachinone. 7. Oxyanthrachinone.

1. Formel und Konstitution der Stammsubstanz. Der den Körpern dieser Klasse zugrunde liegende Kohlenwasserstoff, das Anthracen, ist wie das Naphtalin als ein Verschmelzungsprodukt mehrerer Benzolkerne zu betrachten. Während aber das Naphtalin durch zwei kondensierte Benzolringe gebildet wird, enthält das Anthracen deren drei. Seine Konstitution, die aus verschiedenen unten noch zu besprechenden Synthesen hervorgeht, wird durch folgendes Formelbild wiedergegeben

CH CH CH
CH C C CH
CH C C CH
CH CH CH

8 9 1
7 2
6 3
5 10 4

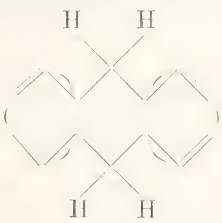
Um die Stellung von Substituenten in Anthracenkernen zu bezeichnen, bedient man sich der in der zweiten Formel angegebenen Numerierung. Es erhellt ohne weiteres, daß es drei isomere Monoderivate des Anthracens geben muß, da nämlich die Kohlenstoffatome 1, 4, 5 und 8, ebenso 2, 3, 6 und 7 und schließlich 9 und 10 unter sich infolge ihrer symmetrischen Stellung in der Molekel keinerlei Verschiedenheit aufweisen. Analog wie beim Naphtalin spricht man von α- (1, 4, 5, 8) und β- (2, 3, 6, 7) Derivaten; die in 9 und 10 substituierten Anthracene heißen γ- oder auch meso-Derivate.

Ueber die Art der Bindung in der Anthracenmolekel gibt am besten das von Thiele aufgestellte Schema Aufschluß, das zwei



richtige Benzolkerne (die beiden äußeren) enthält, deren Eigenschaften aber durch die an den beiden γ-Kohlenstoffatomen befindliche freie Partialvalenz etwas modifiziert sind. Diese Formel erklärt alle gefundenen

Tatsachen in ausreichender Weise: Bei Additionsreaktionen werden die eintretenden Atome oder Radikale sich zunächst der freien Valenz bemächtigen, d. h. Additionen werden zuerst in γ-Stellung stattfinden. Die beiden äußeren Benzolringe zeigen etwas andere Eigenschaften wie normale Benzolringe, was, wie oben schon angedeutet wurde, vorauszusehen ist, so z. B. ist das Anthrol im Gegensatz zum Phenol leicht ätherifizierbar. Beim Dihydroanthracen, in dem die freie Partial-



valenz verschwunden ist, ist dagegen kein Grund mehr vorhanden, ein vom regulären abweichendes Verhalten der beiden äußeren Benzolkerne anzunehmen; in der Tat reagiert das Dihydroanthrol $C_{14}H_{11}.OH$ nicht anders wie ein gewöhnliches Phenol. Neben der Thieleschen Anthracenformel ist vielfach noch eine andere im Gebrauch, die eine p-Bindung zwischen den meso-Kohlenstoffatomen annimmt,



indessen steht diese mit den Tatsachen weniger gut im Einklang.

2. Anthracen: Darstellung, Eigenschaften, Nachweis und Synthesen. Das Anthracen, $C_{14}H_{10}$, wurde als ein Bestandteil des Steinkohlenteers, von dem es etwa ½% ausmacht, im Jahre 1832 von Dumas und Laurent entdeckt. Man gewinnt es aus dessen höchstsiedenden Anteilen, dem sogenannten Anthracenöl, indem man die es begleitenden Substanzen, von denen nur das isomere Phenanthren erwähnt sei, durch Zentrifugieren und Behandeln mit geeigneten Lösungsmitteln entfernt. Das Anthracen ist technisch von großer Bedeutung, da es die Muttersubstanz einer ganzen Reihe sehr wichtiger Farbstoffe bildet.

Das Anthracen kristallisiert in weißen monoklinen Tafeln oder Blättchen von prächtig blauer Fluoreszenz, schmilzt bei 213° und siedet bei 351°. In den meisten organischen Lösungsmitteln ist es schwer löslich, verhältnismäßig leicht in heißem Benzol oder Toluol. Es ist interessant, daß die Fluoreszenz sich bei sämtlichen Derivaten des Anthracens wiederfindet, bei denen noch die freie Partialvalenz der mittelständigen Kohlenstoffe erhalten ist, daß dagegen beim Dihydroanthracen, beim Anthrachinon u. a. eine Fluoreszenz sich nicht mehr beobachten läßt.

Zum Nachweis des Anthracens benutzt man entweder seine Additionsverbindung mit Pikrinsäure, die in schönen roten Nadeln vom Schmelzpunkt 138° kristallisiert, oder man oxydiert es mit Chrom-Schwefelsäuregemisch zu Anthrachinon, welches leicht identifiziert werden kann (vgl. unter 5).

Von Synthesen des Anthracens oder seiner Derivate kennen wir eine große Anzahl; so entsteht z. B. Anthracen selbst aus o-Tolylphenylketon bei der Destillation über glühendem Zinkstaub

CO ... CH_3 = ... + H_2O

Die Konstitution des Anthracens ergibt sich am besten aus seiner Synthese aus o-Brombenzylbromid mit Natrium

CH_2Br ... Br + Br ... $BrCH_2$ + 4 Na =

H H ... H H + 4 NaBr

Es entsteht zunächst Dihydroanthracen, das aber leicht zu Anthracen oxydiert werden kann. Aus dieser Synthese geht einwandfrei hervor, daß die beiden meso-Kohlenstoffatome, welche die zwei äußeren Benzolkerne verbinden, sich an jedem der Kerne in o-Stellung befinden.

3. Homologe, Halogenderivate, Sulfosäuren, Carbonsäuren, Nitroanthracen und Anthramin. Von den Homologen des Anthracens finden sich einige im Steinkohlenteer, so Methyl- und Dimethylanthracen; eine Reihe anderer ist auf synthetischem Wege erhalten worden. Sie lassen sich, ebenso wie das Anthracen selbst sehr leicht zu den entsprechenden γ-Dihydroverbindungen reduzieren; bei Anwendung stärkerer Reduktionsmittel gelingt auch die vollständige Hydrierung, z. B. des Anthracens $C_{14}H_{10}$ zu Perhydroanthracen $C_{14}H_{24}$.

Halogenderivate des Anthracens entstehen durch direkte Halogenisierung dieses Kohlenwasserstoffs, wobei das Halogen zunächst in 9.10-Stellung und weiterhin auch an den äusseren Benzolkernen addiert wird. Beim Er-

wärmen entstehen aus diesen additionellen Verbindungen durch Halogenwasserstoffabspaltung die eigentlichen Halogensubstitutionsprodukte des Anthracens, die bis zu 8 Atomen Chlor oder Brom enthalten können.

Durch Sulfurieren des Anthracens lassen sich je nach den Bedingungen Mono- und Disulfosäuren erhalten, denen jedoch keine größere Bedeutung zukommt, ebensowenig wie den Anthracenkarbonsäuren, von denen ebenfalls eine ganze Anzahl bekannt ist.

Salpetersäure wirkt sehr leicht auf Anthracen ein, doch entsteht dabei nicht direkt ein Nitroanthracen, sondern es lagert sich zunächst HNO_3 glatt an die meso-Kohlenstoffatome des Anthracens an

Dieses Zwischenprodukt wird indessen, je nach den Bedingungen, unter denen man arbeitet, sehr leicht weiter verändert und zerfällt z. B., wenn man bei Gegenwart von Essigsäureanhydrid nitriert, in Wasser und 9-Nitroanthracen

Gelbe Nadeln, Schmelzpunkt 146°. Durch energischere Nitrierung erhält man 9.10-Dinitroanthracen.

Beim Erwärmen mit alkoholischem Kali erleidet das 9-Nitroanthracen eine merkwürdige Umwandlung. Es geht in eine alkalilösliche Substanz über; aus der alkalischen Lösung wird durch Mineralsäuren Anthrachinonoxim gefällt

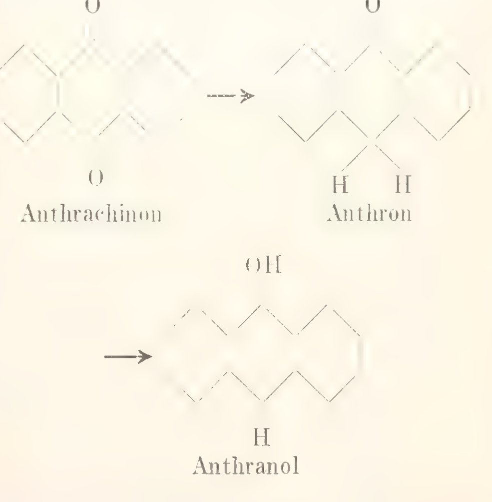
Diese Umlagerung ist auch noch deshalb interessant, weil es gelungen ist, den Mechanismus der eigentümlichen Reaktion durch Isolierung einer Anzahl von Zwischenprodukten in allen ihren Phasen aufzuklären.

Aus dem 9-Nitroanthracen erhält man durch vorsichtige Reduktion das 9-Aminoanthracen, auch 9-Anthramin genannt. Es bildet gelbe, leicht zersetzliche Blättchen, die sich mit gelber Farbe und grüner Fluoreszenz in Alkohol lösen. Es kann auch ebenso wie das 2-Anthramin (1-Anthramin ist nicht bekannt) aus dem entsprechenden Phenol, dem 9-Anthranol, beziehungsweise dem 2-Anthrol durch Einwirkung von wässerigem Ammoniak erhalten werden

$$C_{14}H_9OH + NH_3 = C_{14}H_9NH_2 + H_2O.$$

4. Oxyanthracene. Eine besondere Bedeutung kommt unter den Derivaten des Anthracens dem Anthrachinon zu. Es leitet sich von dem Anthracen durch den Ersatz der beiden mittleren Wasserstoffatome durch Sauerstoff ab und bildet den Ausgangspunkt für die meisten sauerstoffhaltigen Derivate des Anthracens.

Reduziert man Anthrachinon mit Zinkstaub und Salzsäure, so wird ein Sauerstoffatom durch Wasserstoff ersetzt, es entsteht das Anthron, farblose Kristalle vom Schmelzpunkt 155°, die in kalter Kalilauge



unlöslich sind. Beim Kochen aber lösen sie sich mit roter Farbe auf; aus dieser Lösung wird durch Säuren das mit dem Anthron desmotrop isomere Anthranol in braungelben Blättchen vom Schmelzpunkt etwa 120° ausgefällt. Die beiden Desmotropen gehen schon durch Aufnehmen in Lösungsmitteln partiell ineinander über.

Ganz ähnliche Verhältnisse finden sich beim 9.10-Dioxyanthracen, dem Anthrahydrochinon. Auch dieses steht in sehr naher Beziehung zu einem Isomeren, dem Oxanthron

OH — O

OH — H OH

Anthrahydrochinon ⇄ Oxanthron

Oxanthron (weiße Nadeln vom Schmelzpunkt 167°) ist unlöslich in kalter Natronlauge, in kochender Alkalilauge geht es dagegen mit roter Farbe in Lösung; die Flüssigkeit enthält das Natriumsalz des Anthrahydrochinons. Das letztere kristallisiert in braunen Nadeln und wird namentlich in alkalischer Lösung äußerst leicht, schon durch den Luftsauerstoff, zu Anthrachinon oxydiert. Es wird in Form seines tiefroten Natriumsalzes am besten durch Reduktion von Anthrachinon mit Zinkstaub und Natronlauge erhalten.

Andere Oxyderivate des Anthracens lassen sich aus den entsprechenden Verbindungen des Anthrachinons durch energische Reduktion erhalten, z. B. das Anthrarobin (1.2-Dioxyanthranol) aus Alizarin und das Chrysarobin (Methyldioxyanthranol) aus Chrysophansäure; beide Körper finden als Arzneimittel gegen Hautkrankheiten Verwendung.

5. Anthrachinon: Darstellung, Eigenschaften, Konstitution. Das Anthrachinon wird technisch durch Oxydation von Anthracen mit Kaliumbichromat und Schwefelsäure gewonnen. Es kristallisiert in langen gelblichen Nadeln des rhombischen Systems, ist in den meisten organischen Lösungsmitteln sehr schwer löslich, läßt sich aber aus heißem Eisessig gut umkristallisieren. Gegen Oxydationsmittel ist es sehr beständig. Beweisend für seine Konstitution ist seine sehr glatte Synthese aus o-Benzoylbenzoesäure beim Erwärmen mit konzentrierter Schwefelsäure

CO — COOH → O — O + H_2O

Das Anthrachinon ist, wie schon sein Name andeutet, ein dem Benzochinon analoges para-Diketon. Sein von dem eines gewöhnlichen Chinons ziemlich abweichendes Verhalten — es hat keinen chinonartigen Geruch, ist nicht wasserdampfflüchtig, durch schweflige Säure nicht reduzierbar und überhaupt gegen chemische Agentien sehr beständig — erklärt sich aus der anderen Natur seiner Doppelbindungen. Während im Benzochinon die beiden Ketocarbonyle zwischen zwei gewöhnlichen aliphatischen Doppelbindungen stehen, ist im Anthrachinon die Verbindung durch zwei richtige Benzolringdoppelbindungen (also aromatische Doppelbindungen) von viel geringerer Aktionsfähigkeit hergestellt.

Vom Anthrachinon leiten sich eine Reihe technisch sehr wichtiger Beizenfarbstoffe ab; sie sind fast alle Oxyanthrachinone oder Derivate davon; ihr Ausgangsmaterial bilden in erster Linie die Anthrachinonsulfosäuren und in geringerem Umfange die Nitroanthrachinone. In neuerer Zeit haben auch die Aminoanthrachinone Verwendung in der Farbstoffindustrie gefunden.

6. Sulfosäuren, Nitro- und Aminoanthrachinone. Da Anthrachinon gegen Schwefelsäure sehr beständig ist, muß man sich zur Sulfurierung hoher Temperaturen und stark anhydridhaltiger Schwefelsäure bedienen. Man erhält bei diesem Sulfurierungsprozeß nebeneinander die β-Anthrachinonmonosulfosäure und mehrere β-Disulfosäuren, von welchen diejenigen, welche die Sulfogruppen in 2.6- und 2.7-Stellung enthalten, für die Farbstofftechnik von Bedeutung sind, da sie zur Herstellung von Flavo- und Anthrapurpurin Verwendung finden. Die α-Monosulfosäure und die α-Disulfosäuren, die früher nicht durch direkte Sulfurierung dargestellt werden konnten, gewinnt man nach einem neueren Verfahren dadurch, daß man dem Sulfurierungsgemisch geringe Mengen Quecksilber zusetzt; auch diese Sulfosäuren werden auf Farbstoffe verarbeitet.

Verschmilzt man die Sulfosäuren des Anthrachinons zum Ersatz der Sulfogruppe durch Hydroxyl mit Kaliumhydroxyd, so ergibt sich die interessante Tatsache, daß, bei Gegenwart von Luft, nicht nur an Stelle der Sulfogruppe, sondern überdies auch noch für ein Wasserstoffatom im Anthrachinonkern eine Hydroxylgruppe eintritt, so daß man z. B. aus Anthrachinonmonosulfosäure nicht Monooxyanthrachinon, sondern ein Dioxyanthrachinon, nämlich Alizarin, erhält

O, SO_3H, O → O, OH, OH, O

Analog den Sulfosäuren bilden sich beim Nitrieren des Anthrachinons Mono- und Dinitrokörper, von denen bloß die 1-3-,

1.5- und 1.8-Dinitroanthrachinone technische Bedeutung besitzen.

Durch Reduktion der Nitroverbindungen erhält man die entsprechenden Aminoanthrachinone. Das 2-Aminoanthrachinon, das Ausgangsmaterial für die wichtigen Küpenfarbstoffe Indanthren und Flavanthren, läßt sich, da 2-Nitroanthrachinon nicht bekannt ist, nicht auf diesem Wege darstellen; man gewinnt es aus 2-Anthrachinonsulfosäure durch Erhitzen mit wässerigem Ammoniak oder durch Oxydation des 2-Acetaminoanthracens und darauf folgende Verseifung des 2-Acetaminoanthrachinons.

7. **Oxyanthrachinone.** Die Oxyanthrachinone sind infolge ihrer enormen industriellen Bedeutung sehr genau wissenschaftlich erforscht. Sie sind leicht synthetisch durch Kondensation von Oxybenzoesäuren mittels Schwefelsäure zu gewinnen. So gibt die m-Oxybenzoesäure beim Erhitzen mit Schwefelsäure drei isomere Dioxyanthrachinone nach folgendem Schema (Bildung von 2.6-Dioxyanthrachinon)

HOOC OH
HO COOH →

O
HO— —OH
O

Die beiden möglichen isomeren Monooxyanthrachinone sind bekannt; sie sind keine Farbstoffe und nur von theoretischem Interesse. Die Eigenschaft, kräftige Beizenfarbstoffe darzustellen, kommt nur solchen Oxyverbindungen des Anthrachinons zu, die mindestens zwei Hydroxylgruppen und zwar diese in Orthostellung enthalten. Von den 10 isomeren Dioxyanthrachinonen — 9 davon sind mit Sicherheit bekannt — besitzt daher nur die 1.2- und 2.3-Verbindung diese Eigenschaft. Das 1.2-Dioxyanthrachinon ist der wichtigste Farbstoff der ganzen Gruppe; er hat den Namen Alizarin und ist in der Krappwurzel (Rubia tinctorum) in Form eines Glukosids (der Ruberythrinsäure) enthalten. Lange Zeit wurde Alizarin ebenso wie Indigo ausschließlich aus dem Naturprodukt gewonnen. Es war der erste natürliche Farbstoff, dessen künstliche Darstellung im Laboratorium gelang; heutzutage hat die Fabrikation des Alizarins aus Anthracen den Krappbau so gut wie vollständig verdrängt.

Die technische Gewinnung des Alizarins geht aus von der Anthrachinonmonosulfosäure, die bei der Kalischmelze in Gegenwart von Luft oder einem Oxydationsmittel — man setzt der Schmelze jetzt stets Kaliumchlorat zu — unter Austausch der Sulfogruppe und des in 1-Stellung befindlichen Wasserstoffatoms durch die Hydroxylgruppe in Alizarin übergeht. Das Alizarin schmilzt bei 289 bis 290°, siedet bei etwa 430° und ist in organischen Lösungsmitteln löslich; aus Alkohol kristallisiert es in gelbbraunen Prismen oder Schuppen, aus Benzol in roten Nadeln; in Alkalien ist es als Phenol leicht löslich. In der Natur findet sich auch der 1-Monomethyläther des Alizarins (in der sogenannten Chaywurzel von Oldenlandia umbellata), der früher ebenfalls in der Färberei verwendet wurde. Das Alizarin ist ein Beizenfarbstoff; von seinen Lacken mit Metalloxyden findet hauptsächlich der Tonerdelack in der Türkischrotfärberei Verwendung. Vom Alizarin direkt leiten sich noch einige wichtige Farbstoffe ab, so das Alizarinorange (β-Nitroalizarin) und das Alizarinblau, das aus Nitroalizarin bei Behandlung mit Glycerin und Schwefelsäure entsteht und die Verschmelzung einer Alizarinmolekel mit einem Chinolinring darstellt:

O OH
OH
N
O

Die bekannten Trioxyanthrachinone sind sämtlich Oxyalizarine und als solche Beizenfarbstoffe; das Purpurin (1.2.4-Trioxyanthrachinon) findet sich neben dem Alizarin im Krapp und kann künstlich aus einer Sulfosäure, die beim Erhitzen des Alizarins mit rauchender Schwefelsäure entsteht, der Alizarinpurpursulfosäure, mittels Kalischmelze erhalten werden. Flavopurpurin (1.2.6-Trioxyanthrachinon) und Anthrapurpurin (1.2.7-Trioxyanthrachinon) werden durch Alkalischmelze der Anthrachinondisulfosäuren gewonnen und kommen meist miteinander gemischt in den Handel.

Tetraoxyanthrachinone stellt man technisch aus den Dioxyanthrachinonen, die ein Hydroxyl in 1-Stellung enthalten, durch Erhitzen mit anhydridhaltiger Schwefelsäure her, wobei sich Schwefelsäureester der höher hydroxylierten Anthrachinone bilden, welche dann verseift werden. Die Tetraoxyanthrachinone führen den gemeinsamen Namen Bordeaux und sind wichtige Beizenfarbstoffe. Aus ihnen gewinnt man durch weitere Oxydation mit Arsensäure oder Braunstein die wertvollen Cyanine, Penta- und Hexaanthrachinone.

Zum Schlusse möge noch das in der Wollfärberei vielfach verwendete Anthracenblau Erwähnung finden, das durch Einwirkung von Schwefel und Schwefelsesquioxyd auf die oben angeführten Dinitroanthrachinone gewonnen wird.

Literatur. ***V. Meyer und Jacobson,*** *Lehrbuch der organischen Chemie Leipzig 2. Band 2. Teil.* — ***Thiele,*** *Theorie der ungesättigten und aromatischen Verbindungen. Liebigs Annalen* ***306*** *141 1899.* — ***J. Meisenheimer,*** *Reaktionen aromatischer Nitrokörper. Liebigs Annalen* ***323*** *205 1902 und* ***330*** *133 1904.* — ***K. H. Meyer,*** *Zur Kenntnis des Anthracens. Liebigs Annalen* ***379*** *37 und 73 1911.* — ***R. Bohn,*** *Ueber die Fortschritte auf dem Gebiet der Küpenfarbstoffe. Berichte der deutsch. chem. Gesellsch.* ***43*** *987 1910.*

Jakob Meisenheimer.

Anthropogenese.

1. Begriff der Anthropogenese. 2. Phylogenese und Gliederung der Primaten. 3. Der Mensch innerhalb der Primaten. 4. Ursachen, Art und Weise der Menschwerdung. 5. Zeit und Ort der Menschwerdung.

1. Begriff der Anthropogenese. Der von E. Haeckel vollends festgeprägte Begriff der Anthropogenese kann als die Lehre vom Werdegang der Primatengruppe „Mensch" bezeichnet werden. Sie sucht also diesen in allen Einzelheiten festzustellen und untersucht demnach 1. die stammesgeschichtliche Entstehung (Phylogenese) und verwandtschaftliche Gliederung der gesamten Primaten; 2. die Stellung des Menschen innerhalb dieser Formen; 3. die Art und die Ursachen der Menschwerdung und 4. die Zeit und den Ort der Menschwerdung.

Diese sämtlichen Punkte sind noch in vollster Diskussion, die gerade in letzter Zeit außerordentlich lebhaft geworden ist. Die neue Inangriffnahme ging aus von G. Schwalbes grundlegenden Arbeiten über Pithecanthropus und Neandertalmensch (1899 und 1901), mit denen eine neue Periode anthropologischer Forschung einsetzt. In ihr hat dann H. Klaatsch eine Menge Anregungen gegeben und für das Aktuellwerden des Problems gesorgt. Eine große Anzahl neuer Funde kamen dem sehr zustatten (vgl. hierzu den Artikel „Fossile Hominiden"), ebenso die noch mitten im Meinungskampf stehende Eolithenfrage. So kann man zurzeit nicht ein fertiges Ergebnis, sondern nur die Probleme und sich widersprechenden Meinungen darstellen. Kohlbrugge (1908) gibt eine kritische, z. T. hyperkritische Darstellung des Standes der Probleme, Branca (1910) schildert den Stand der fossilen Funde.

2. Phylogenese und Gliederung der Primaten. Es ist wohl am richtigsten, den Namen Primates so anzuwenden, wie es zuletzt M. Weber tat (1904), d. h. nicht als Ordnungsnamen, sondern zur weiteren Fassung von Tierstämmen (Ordnungen), „die trotz aller Verschiedenheit ein verwandtschaftliches Band vereinigt", also ähnlich wie Ungulaten, nur daß die Primaten weniger solche Einzelstämme umfassen als diese. „Es handelt sich um 3 Hauptstämme: Die Prosimiae, die Affen der Alten und die der Neuen Welt" (Weber).

So ganz einfach und einwandfrei ist nun aber diese Dreiteilung nicht, da eine Reihe fossiler und rezenter Formen Schwierigkeiten macht, von Lebenden vor allem Tarsius und dann der Mensch.

Die Phylogenese der Primaten geht sehr weit zurück, wenn man die sämtlichen Halbaffen mit hereinnimmt, und der Anschluß der Primatenmorphologie an die primitiven Formen ist einigermaßen zu erschließen; allerdings bestehen über alle Einzelheiten noch sehr auseinandergehende Meinungen. Klaatsch betont vor allem die Rolle, die der Fuß in dieser Entwickelung gespielt hat. Er erschließt ein sehr primitives Säugerstadium, das fünffingerige Extremitäten besaß, deren erste Zehe abspreizbar und opponierbar, deren Gebiß einfach, ohne sehr starke Differenzierung, ohne große Eckzähne, mit höckerigen Mahlzähnen war. Er nennt sie „Primatoiden". Sie entwickelten sich wohl aus Urreptilien. Beuteltiere haben viele solcher Merkmale bewahrt; ob diese Primatoiden erst ein Beuteltierstadium durchgemacht haben, ist nicht zu erkennen. Die bekannten Chirotherienfährten gehören hierher.

Von diesen Primatoiden aus entwickelten sich eine Menge Säugetiere, meist unter Verlust der altererbten und ursprünglichen Handform der Extremität. Alte Formen, frühtertiäre Carnivoren usw., haben noch viel davon bewahrt. Eine Gruppe nun behielt fast alles, blieb zentrale Gruppe, das sind die Primaten. Deren niederste Formen, die Lemuren, haben sogar den Handcharakter (Daumen) ganz besonders ausgeprägt. Von jenen ersten Primaten aus sind die einzelnen Stämme auseinander gegangen, so daß schon seit dieser ältesten Primatoidenzeit (Tertiärbeginn) Affen und Mensch nichts mehr miteinander zu tun hatten (so Klaatsch noch 1901; über seine späteren Ausführungen vgl. weiter unten). Sehr frühe Entstehung und Anschluß an allerprimitivste Säugetiere nimmt man jetzt allgemein für die Primaten an (z. B. Hubrecht 1909). Von den Vorfahren der als aberrant zu betrachtenden Beuteltiere entstanden wohl generalisierte Placentalier, denen dann gleichzeitig die primitivsten Insektivoren und Primaten sehr nahe gestanden haben mögen. Das zeigt nicht nur der Bau des Fußes, sondern auch

die Bezahnung und eine ganze Reihe anatomischer Merkmale; so prägt sichs z. B. auch in der an gewisse reptiloide Formen deutlich anklingenden Gestaltung des knorpeligen Primordialschädels aus (E. Fischer Affen und Tarsius). Auf den Resultaten vergleichender Morphologie der lebenden und fossilen Formen bauten vor allem Hubrecht (1909), Schlosser (1907, 1910), Wortman (1903), Osborn, Cope u. a. ihre Theorien auf, so daß sich jetzt etwa folgende Uebersicht geben läßt. Als älteste Primatengruppe sind (nach Schlosser) die Mesodonta aufzufassen (Eocän und unterstes Miocän von Europa und Nordamerika), die dann in 3 Gruppen zerfielen: die älteste, d. h. sich am primitivsten erhaltenden Pseudolemuroidini (mit J [Incisivi = Schneidezähne]: $\frac{3}{3}$ und Krallen), dann die Paläopithecini (mit reduzierter Prämolarzahl) und die Mixodentini ebenso wie jene, aber auch bald die Incisivi reduziert. Von der ersten Gruppe, den Pseudolemuroiden, stammen wieder 3 Familien, die Hyopsodontidae und Notharctidae, von denen beiden möglicherweise die Affen abstammen könnten, die im Miocän von Europa und Südamerika auftreten und deren Zahnbildung aus jenen sich erklären ließe. Dabei kämen von der ersten Familie die Cercopitheciden, von der anderen die Cebiden und indirekt die Anthropoiden und Hominiden. Die dritte Familie aber, die Adapiden, hätte dann den meisten fossilen und heutigen eigentlichen Lemuren den Ursprung gegeben. Anderen Stammes wäre dagegen die heutige Form Tarsius, die auch Hubrecht aus embryologischen Gründen von den Lemuren ganz abrückt, Andere wenigstens als etwas Besonderes auffassen. Die eocänen Formen Anaptomorphus und Necrolemur zeigen mit Tarsius viel Uebereinstimmung, andererseits erlaubt es die Einzelausbildung der Zähne nicht, einen vom anderen abzuleiten, so daß man sie zu einer Gruppe vereinigen muß und annimmt, daß Tarsius sich aus dieser primitiven, wohl von oben genannten Palaeopithecini abstammenden Familie als primitive und vielfach generalisiert bleibende Form erhalten hat. Hier sind nun außerordentlich wichtige neue Funde zu erwähnen, über die aber erst kurze vorläufige Mitteilungen vorliegen. Schlosser (1910) beschreibt sie kurz. Es sind Funde von Affenkiefern aus frühtertiären Schichten in Fayum-Aegypten. Die Formen Parapithecus und Moeripithecus sollen (Schlosser 1911) geradezu den Anschluß zwischen anaptomorphiden, tarsiiden und anthropomorphen Affen vermitteln.

Dadurch wird jene lebende Form Tarsius also abermals unserer phylogenetischen Reihe nahegerückt. Das ist aber besonders wichtig, weil wir dadurch auch in den Bau der Weichteile solcher Formen Einblicke gewinnen, und hierin gerade Tarsius deutliche Beziehungen zu den Affen zeigt. Auch eine andere hierher gehörige fossile Form, Omomys, zeigt im Molarenbau sehr deutliche Beziehung zu Südamerikaaffen (Wortman). Die Lemuren (ohne Tarsius) sind also danach Primaten, die relativ früh entsprangen und mit der Entwickelungsbahn der Affen nichts zu tun haben; nur durch ihren frühen Ursprung haben sie manches erhalten, was Affen eventuell auch festgehalten haben von ihren eigenen Vorfahren her.

Uterusform der Lemuren teils duplex, teils bicornis; bei Affen einfach. Zitzen teils 3 Paare, teils 2 oder 1 Paar; bei Affen 1 Paar. Augenhöhle gegen Schläfenhöhle partiell geschlossen; bei Affen völlig geschlossen usw. Sie haben aber auch, wie Hubrecht (1909) betont, manche Dinge weniger primitiv wie Affen, so gewisse Allantois- und Plazentationsverhältnisse.

Tarsius aber, die alte Form, läßt erkennen, daß gewisse Bildungen an Placenta und Fruchthüllen der Affen und Menschen schon so tief unten sich ausbilden. Hubrecht betont, daß der Unterschied zwischen der Scheibenplacenta des Tarsius und den Placenten der Lemuren außerordentlich tiefgehend ist und auf zweierlei Abstammung hinweise, womit obige Ausführung der Paläontologie stimmt. Nach oben aber gleicht diese diskoidale Tarsiusplacenta einigermaßen — nicht ganz, da der große Blutsinus fehlt (s. Strahl Handbuch d. Entwickelungsgesch. 1906) — der der Affen und Menschen, ebenso tun dies die Fruchthüllen; ja ein sogenannter „Haftstiel" kommt nur Tarsius und jenen zu, sie als nahe verwandt und (nach Hubrecht) zugleich darin primitiv erweisend.

Noch viele Einzelheiten bleiben hier aufzuklären. Aber daß Lemuren primitive und dann aberrante Primaten sind, Tarsius eine in manchem spezialisierte, aber weit abwärts ansetzende und uns Anschlüsse verratende Form ist und daß sich von diesen Wurzeln die Affen und Menschen abspalten, scheint klar zu sein. Außerordentlich schwer ist aber nun wieder die genealogische Gliederung der Affen.

Schon die oben gemachten paläontologischen Angaben zeigen, daß das alte Haeckelsche Schema Lemuren — Platyrhine — Catarrhine — Anthropoide — Mensch, wobei jedesmal aus Primitivformen der einen Gruppe solche der nächsten entstammen, lange nicht mehr in allen Einzelheiten haltbar ist. Die schwierigste Frage ist das Verhältnis der Anthropoiden zu den beiden Gruppen niederer Affen, alt- und neuweltlicher. Da stehen

sich die Meinungen ziemlich schroff entgegen.

Oben wurde schon Klaatschs Ansicht wiedergegeben, der die heutigen Formen selbständig sehr weit zurückverfolgen will. Auch in dieser Frage kommt das scharf zum Ausdruck. Er nimmt an, daß in weit zurückliegenden urlemuroiden Stadien sich die heutigen Formen trennten; daß dort die Platyrhinen abgingen und nichts mehr mit den anderen zu tun haben, ebenso die Catarrhinen, so daß die höheren Formen nicht über deren Wurzeln hinweg ihre Entwickelungsbahn nahmen, sondern neben ihnen vorbei. Dem schließt sich Adloff (1908) völlig an. Er läßt schon bei creodontenartigen Formen im alleräItesten Tertiär 6 selbständige Stämme entstehen, die sich dann unabhängig voneinander und parallel oder etwas divergent nebeneinander alle auf ein pseudolemurines, dann lemurines, dann platyrhines Stadium erhoben, von jedem haben einzelne ihre Organisation beibehalten, so daß dann alle Aehnlichkeiten Parallel- und Konvergenzerscheinungen wären, außer jenen, die schon von Creodontiern her ererbt sind.

Auch Ameghino steht auf ähnlichem Standpunkt. Er leitet Ost- und Westaffen je gesondert von eocänen Südamerikaformen ab, lemurenartigen Geschöpfen, aus deren dürftigen Resten er eine ganz außerordentliche Menschenähnlichkeit erkennen will. Von ihnen sollen dann vormenschliche Formen, „primitive Hominidae", entstammen und von diesen sowohl Menschen, als auch durch Bestialisierung die Anthropoiden. Danach ständen also die einzelnen Affengruppen auch nur in sehr losem Zusammenhang.

Diesen neueren und im ganzen samt und sonders mehr auf Ansichten und Vorstellungen als auf gewaltigem und die alten Ideen stürzendem neuen Beweismaterial aufgebauten Theorieen einer Parallel- und Konvergenzentwickelung der Affen- und Menschengruppen steht die ältere und vor allem von Schwalbe (1899 bis 1910) aufs neue und glänzend verfochtene Ansicht von einer genealogischen näheren Zusammengehörigkeit jener Gruppe, von ihrem zweigartigen Herausspringen aus einem Stamm schroff gegenüber. Sie schließt sich im ganzen an Haeckel (1903) an.

Niemand von den Anhängern dieser Lehre hat sich wohl vorgestellt, daß aus „heutigen" Platyrhinen, ja auch nur aus fertig bis etwa zur heutigen Höhe entwickelten fossilen Platyrhinen die Catarrhinen, aus fertigen Catarrhinen die Anthropoiden entstammen oder daß gar aus Schimpansen oder Gorillas die Menschen sich entwickeln, wie es gelegentlich von Gegnern unterschoben wird.

Die Meinung dieser Theorie ist die, daß von der lemurenhaften (tarsiiden) Wurzel aus die Entwickelung ein Stück weit in einer einzigen Richtung ging; dann trat Divergenz in zwei Sprossen ein: einer führte zu den Platyrhinen, die also von diesem alten Stadium her einige wenige gemeinsame Merkmale mit dem anderen Sproß gleichartig ererbt, andere aber allein behalten haben, während jener sie verlor und wieder andere erst seitdem selbständig erwarb. Dieser zweite Sproß sind die noch vereinigten Catarrhinen — Anthropoiden — Hominiden. Wieder trat Zweiteilung ein und die Catarrhinen schwenkten ab, sie entwickelten sich nach ihrer Seite, „nach einer Sackgasse hin", „während Anthropoiden und Mensch zunächst gemeinsam einen fortschrittlichen Weg einschlagen, der die vielen Uebereinstimmungen von Mensch und Anthropomorphen verständlich macht, ohne den Menschen direkt von den jetzt lebenden Anthropomorphen abzuleiten" (Schwalbe 1909). Neue Stützung wird diese Meinung durch die oben schon erwähnten jüngsten Funde fossiler Affen in Aegypten erfahren. Schlosser (1911) beschreibt außer jenen „Affen" noch einen fossilen Anthropoiden „Propliopithecus", der „sicher der Ahne" des Pliopithecus und „wohl auch aller Simiiden und Hominiden" sein soll. Da würde also der paläontologische Beweis sich neben den vergleichend-anatomischen stellen (eine ausführlichere Darstellung des Fundes steht bevor).

Einstweilen ist die Grundlage der ganzen Theorie die Vergleichung der lebenden Formen, und die spricht recht eindeutig.

Man kann die von einer systematischen Gruppe zur nächsten sich einschränkenden Merkmale, Gemeinsamkeit hier und Verschiedenheit dort nur so erklären.

Schwalbe bringt als Beispiel, daß bei paralleler Entwickelung aller Gruppen aus einer Urform es nicht zu verstehen ist, daß Ostaffen, Anthropoiden und Hominiden nicht mehr den primitiven Paukenring als Gehöreingang besitzen, während Westaffen ihn noch haben, es müßten also drei Gruppen ihn je selbständig und auf genau dieselbe Weise verloren haben. Macnamara (1905) zählt nach Keith Identitäts„punkte" in der Organisation der Gruppen auf und zeigt, wie die Kreise sich stets verengern. Natürlich haben auch früh abgezweigte Formen noch manche Merkmale gleich behalten mit den höher entwickelten, eben solche, die bei diesen auch konservativ blieben. Dadurch erheben sich gewisse Schwierigkeiten in der Beurteilung der gegenseitigen Stellung.

Jede von den höheren Gruppen hat einzelne Aehnlichkeiten mit den Platyrhinen. Am meisten beachtet wurde dabei der Zahnbau. Der Zahnformel nach gehören die Anthropoiden und Hominiden zu den öst-

lichen, catarrhinen Affen, aber die Stellung der Molarhöcker ist bei Catarrhinen paarweise opponiert, bei Platyrhinen und Anthropoiden dagegen alternierend. Schlosser erscheint dieses Moment besonders wichtig; Schwalbe findet die Gleichheit der Zahl und Gesamtanordnung doch bedeutungsvoller. Da müssen eben die Catarrhinen seit ihrer Abzweigung aus der ihnen und den Platyrhinen gemeinsamen Bahn, sich bezüglich der Höckerstellung besonders differenziert haben. L. Bolk „erklärt" die wechselnden Formen (Zeitschr. Morph. Anthrop. 1910). Dasselbe läßt sich für andere Dinge nachweisen. Der Interorbitalraum, also die Nasenwurzel zwischen den Augenhöhlen, ist bei den niederen Westaffen relativ breit, dann bei Ostaffen schmal, bei Anthropoiden und Hominiden wieder breit. Sollte die Gesamtentwickelung so schwankend verlaufen sein? Nein, Schwalbe (1899) zeigt, daß die ältesten Formen der „Schmalnasen", z. B. Mesopithecus pentelici, noch breiten Interorbitalraum gehabt haben, so daß die Verschmälerung jüngst erworben sein muß und Fischer (1903) setzt die Parallele aus der Ontogenese daneben, der Schädel legt sich knorpelig, zuerst breitnasig an.

Aehnlich wird es sich wohl mit den anderen Punkten bei Platyrhinen verhalten, für die eine Reihe von Aehnlichkeiten mit höheren (anthropoiden) Formen angegeben sind, vor allem bei Ateles. Allerdings glatt erklären läßt sich hier die Organisation nicht. Ateles hat nämlich an fast allen Organsystemen einzelne Bildungen, die viel mehr an die der Hominiden und Anthropoiden heranreichen, ja ihnen völlig gleichen, als es je bei anderen West- oder sogar Ostaffen vorkommt. A. v. d. Broek (1908) stellt 40 solche Merkmale zusammen, von denen solche am Kleinhirn, an Nervengeflechten, an Muskeln und Schädelnähten am auffallendsten sind. Sie liegen alle in der Entwickelungsrichtung, die auch die Anthropoiden genommen haben, und Kohlbrugge (1908) und v. d. Broek (1908) haben recht, wenn sie meinen, „Konvergenz" erkläre da nicht befriedigend; indes sofort phylogenetisch zu deuten, also alle Catarrhinenwurzeln wegzulassen und die Anthropoiden direkt an atelesartige Formen anzuschließen, scheint doch verfrüht, zumal wenn man bemerkt, daß gerade Ateles auch sonst variiert, wo es bei Säugern ganz selten ist, z. B. durch Verdoppelung der Arteria basilaris (Elze Anat. Anz. 37 1910). Im ganzen bietet das Verhalten des Ateles noch manches Rätsel.

3. Der Mensch innerhalb der Primaten. Selbstverständlich bedingt es nur das besondere Interesse, das wir eben am Menschen haben, daß wir die Frage nach der Zugehörigkeit des Menschen zum Primatenreich und seine Stellung darin besonders eingehend untersuchen.

Daß der Mensch zu den Säugetieren und dann zu den Primaten gehört, ist klar, man wird ihn dann am einfachsten neben die Unterordnungen Cercopithecidae, Anthropomorphae usw. als Hominidae setzen. Diese Zugehörigkeit hier zu erörtern, ist unnötig; sie zeigt jede Vergleichung irgendeines Lehrbuches menschlicher Anatomie mit M. Webers (1904) Säugetieren, speziell „Simiae". Es sei weiter auf die als Resultat aller vergleichend-anatomischen Untersuchungen allgemein angenommene und wörtlich verstandene Bezeichnung Anthropomorphae (Anthropoidea) hingewiesen, Spezialangaben enthalten zusammengestellt Wiedersheims Bau des Menschen (1908), Haeckels Anthropogenie (1903), Friedenthal (1911) und ähnliche Bücher. Auch der von Huxley 1863 aufgestellte „Pithecometrasatz" gehört hierher, daß die Unterschiede zwischen Mensch und Anthropoiden geringer seien als zwischen diesen und den niederen Affen, ein Satz, der sich in vielen Einzelheiten nicht halten läßt. Nur ein einziger Punkt sei noch besonders erwähnt, der sogenannte Nachweis der Blutsverwandtschaft. Die Arbeiten von Friedenthal (1904), Uhlenhuth (1904, 1907), Wassermann, Nuttall u. a. zeigen, daß im feinsten Ablauf von Präzipitinreaktionen des Blutes (mehrere Methoden), also in dessen feinstem chemischen Eiweißaufbau, die Anthropoiden dem Menschen viel näher stehen, als andere Affen, die Platyrhinen am weitesten ab. So interessant und wichtig diese Entdeckung ist, für den Morphologen bedeutet sie im Prinzip nichts anderes, als was die Gleichheit gröberer Formen, dann die Gleichheit feinster histologischer Strukturen auch dartut; sie ist nur ein noch feinerer Nachweis und einer an einem Merkmal, das nicht gut durch gesonderte Selektion oder Mutation oder sonst einen Prozeß bei nicht genealogisch verwandten Formen identisch geworden sein kann, daher ein außerordentlich starker Beweis.

Jene Gleichheit feinster histologischer Strukturen bei Mensch und Anthropoiden muß übrigens noch geprüft werden, eine feine vergleichende Histologie dieser Formen (Anthropoiden) fehlt ganz. Sie wird manche Ueberraschung bringen. Retzius (Biol. Unters. XV Stockholm 1910) zeigt, daß Orang-Spermien nicht so ganz menschenähnlich sind, denen niederer Affen näher stehen — ein bedeutungsvoller Hinweis. Von den Spermien des Gorilla und Schimpanse wissen wir nichts. Andererseits hat Kolmer (Arch. mikr. Anat. Bd. 74 1909 S. 259) erwiesen, daß in der feinen Anatomie des inneren Ohres Ver-

mehrung der Haarzellen, Stranganordnung der Nervenzellen usw.) die Anthropoiden dem Menschen am nächsten stehen, der Orang fast nicht von ihm zu unterscheiden ist; die Westaffen stehen weiter ab.

Das Problem, welches im einzelnen die Etappenlinie der Menschwerdung sei, ist durch die zahlreichen neuen Funde der letzten Jahre außerordentlich aktuell geworden, aber noch weit ab von seiner einheitlichen Lösung (auf die Anatomie dieser Funde wird an anderer Stelle eingegangen, vgl. den Artikel „Fossile Hominiden"). Man kann augenblicklich nur die Meinungen der einzelnen Autoren nebeneinander stellen, es ist nichts Fertiges zu bieten. Die letzten Zusammenfassungen geben tatsächlich auch kein „Bild", sondern nur Kritik, ohne eine eigene oder fremde Meinung als richtig herauszuarbeiten, so Kohlbrugge (1908) und Branca (1910).

Die Ansichten variieren also sehr stark. Eine Anzahl Forscher (Ameghino, Klaatsch, Schoetensack, Adloff) leiten den Menschen von frühen Primatenformen ab, wobei seine Bahn neben der der Anthropoiden vorbeigehen soll, unabhängig von ihnen. Die Menschheit in sich ist dabei als eines Ursprunges angenommen, monophyletisch.

Dann erhebt sich aber auch die Meinung, daß Menschen und Anthropoiden doch näher zusammengehören, aber die Stämme aus jenen Wurzeln getrennt entsprossen, also polyphyletisch. Das lehrt Sergi und, seit er die neuesten Funde studiert hat, Klaatsch. Weiter leitet Kollmann den Menschen von Uranthropoiden ab, die aber eher Urmenschen waren, von denen dann ihrerseits die Anthropoiden entstanden. Endlich lehren Haeckel und Schwalbe an ein richtiges Uranthropoidenstadium und von da aus an monophyletische Menschenentstehung denken.

Daß dabei nun auch noch die Einzelvorstellungen bei jedem Autor verschieden sind, ist ohne weiteres klar. Folgendes sind die wichtigsten Theorien. Ameghino (1909) nennt eocäne Lemuriden (vielleicht sind sie aber jünger) wegen ihrer Menschenähnlichkeit Homunculus und Anthropops. Von ihnen sollen in einer Richtung, je eine aus der anderen, folgende Formen entstanden sein: „Homindae primitifs", daraus einerseits alle Anthropoiden, andererseits der Tetraprothomo argentinus, aus diesem ein noch nicht gefundener Triprothomo, aus dem der Diprothomo platensis, aus dem der noch zu findende Prothomo, daraus Homo, daraus Homo pampaeus, daraus Homo sapiens, daraus einerseits Homo primigenius, andererseits Homo sapiens, d. h. Europäer, Mongolen und Indianer. Dagegen entsprang vom „Homo" (kurzweg, also der Stufe vor dem pampaeus) der Homo ater (Neger und Australier). Vom genannten Triprothomo ging als Seitenform Pithecanthropus ab, vom noch älteren Tetraprothomo aber als Seitenform über einen Homosimius der Pseudhomo Heidelbergensis. Ameghino beschreibt das Diprothomo-Schädeldach sehr genau. Er schreibt es dem untersten Pliocän zu, andere Geologen halten die betreffende Schicht für mitteldiluvial (Schwalbe 1910). Das Schädeldach wird von Ameghino zu einem den Südamerikaaffen etwas ähnelnden Urmenschenschädel ergänzt; Schwalbe (1910) weist einwandfrei nach, daß die Orientierung der Abbildungen falsch, die Rekonstruktion absolut unhaltbar und das Schädeldach seiner Form nach das eines gewöhnlichen rezenten Menschen ohne die geringste Formabweichung ist. Ein Diprothomo existiert also nicht. Auch Friedemann, v. Luschan (Zeitschr. Ethn. 1910), Mochi u. A. sind der Ansicht. Das Oberschenkelstück des Tetraprothomo ist strittig in seiner Deutung; es könnte eventuell einem Huftier angehören (Schwalbe 1909). An einem menschlichen Atlas (vom „Monte hermoso"), den Ameghino ebenfalls hierher zählt und für miocän hält, findet Lehmann-Nitsche (1907) einige vom heutigen Typ abweichende Einzelheiten, er schreibt ihn einer älteren Form zu, die er Homo neogeus nennt; er hält ihn aber für pliocän. Er glaubt, es sei ein Vorfahr von Homo sapiens oder von Homo primigenius, der also dann nicht die einzige erloschene Form darstelle.

Ganz andere Beachtung als diese, wohl abgetane, Ameghinosche Spekulation verdient die Theorie Klaatschs. Er führt in einer großen Zahl sich rasch folgender Arbeiten aus, daß „der zum Menschen führenden Linie eine zentrale Stellung zuzuweisen sei", „da sein tierischer Vorfahr direkt an die Wurzel des Säugetierstammes anknüpft, so verlieren sämtliche Seitenzweige desselben ihre Bedeutung für die Vorgeschichte des Menschen" (1901/02). Alle niederen Affen, aber auch die Anthropoiden sind danach so früh vom Primatoidenstadium abgegangen, daß sie keine nähere Verwandtschaft haben und daß beim Menschen nur alte primatoide Merkmale, nicht Affenähnlichkeiten gefunden werden können. Klaatsch gibt dann eine Menge Hinweise aus dem Aufbau des Fußes usw. Besonders wichtig für seine Aufstellung wurde nun die Untersuchung seines Australiermateriales, an das er nach dem Studium der Neandertalformen heranging

und von dem aus er dann wieder die neueren Diluvialfunde beurteilte. Dabei kommt er durch Untersuchung des Schädeldaches und besonders der Nase zu dem Schlusse, daß die Gruppe der Neandertalformen gegen die heutigen eine Sonderstellung einnehme, aber nicht als Vorfahren anzusehen sei; die Neandertaler sind in manchem noch generalisiert, aber der Name „primigenius" dünkt Klaatsch ganz ohne Berechtigung, da eben der Neandertaler in vielen Dingen sehr fortgeschritten ist, höher entwickelt als etwa die Australier. Diese knüpfen in der Niedrigkeit ihres Schädels, dem dabei die Breite abgeht, die der Neandertaler erwarb, in manchen Merkmalen der Nase, der Orbita usw., an tertiäre Vormenschen an, sind präneandertaloid. Von jenen Formen aus müssen sie sich schon voneinander getrennt und die Australier mehr generalisierte Formen gewahrt haben als der Neandertaler. Der Pithecanthropus scheidet ebenfalls aus der Vorfahrenreihe des Menschen aus; ihn sieht Klaatsch an als ein „Derivat der gemeinsamen Ahnen, welcher bereits die Anthropoidenbahn betreten hatte, dabei aber noch so ‚generalisiert' war, daß Anklänge an jetzt weit getrennte Menschenaffenformen bestehen und zugleich größere Menschenähnlichkeit, als die heutigen Vertreter sie aufweisen" (1908). Daß er wirklich „erectus" war, bezweifelt Klaatsch stark. So haben wir also in allen jenen Fossilen keine Vorfahren, sondern Nebenzweige von der Menschenbahn zu sehen. Diese Bahn aber sieht Klaatsch zunächst als einheitlich an, was aus der Gemeinsamkeit der Details aller Organe, trotz Variabilität, dann aus dem Vorhandensein scheinbar unbedeutender Kleinigkeiten, die allen Anthropoiden fehlen (Lippenrot, Schambehaarung usw.), hervorgehe, „es wäre ganz undenkbar, daß zufällig solche speziellen Gestaltungen mehrfach und unabhängig sich gebildet haben sollten" (1901/02). Die Aurignac-Funde veranlaßten dann Klaatsch zur Aenderung dieser Ansicht (s. u.).

In engem Anschluß an Klaatsch bewegen sich Schoetensacks (1908) Vorstellungen. Der Unterkiefer von Mauer bei Heidelberg gehört nach ihm einer präanthropoiden und zugleich präneandertaloiden Form an, einem generalisierten Typ, von dem Anthropoiden unter Erwerbung tierischer Merkmale (Gebiß) nach einer und Menschen unter Beibehaltung der primitiven (menschlichen) Merkmale (Zähne) nach der anderen Seite ausgingen.

Hier findet vielleicht am besten Platz, daß Branca (1910) an die Möglichkeit denkt, Pithecanthropus könnte ein Bastard von Gibbon und Mensch sein, die sich vielleicht damals beide noch näher standen.

Endlich muß Adloffs (1908) Ansicht hier genannt werden, der auf Grund von Eigenheiten der Bezahnung (Abänderung der ersten Prämolaren der Anthropoiden und anderes) die Anthropoiden und den Menschen früh sich trennen läßt. Aber auch für den Menschen selbst gelangt Adloff auf Grund seiner Zahnuntersuchungen zu genealogischen Schlüssen: Die Zähne des Krapinamenschen können wegen Ausbildung einer Anzahl von Sonderbildungen (Tuberculum auf der Lingualseite der Incisiven; hochgradige, bei fast 50 % auftretende Verschmelzung der Wurzeln u. a.) nicht einem Vorfahr des heutigen Menschen angehört haben. Der Spymensch dagegen hat gerade diese Merkmale nicht, hat vielmehr Aehnlichkeit mit dem heutigen Menschen und unterscheidet sich von diesem nur durch einige primitive Merkmale; er kann sein Vorfahr gewesen sein. Danach hätten im Diluvium zweierlei Menschenarten existiert; die krapinische möchte Adloff als Homo antiquus bezeichnen.

Ohne die Grundideen aller dieser Klaatschschen Theorieen völlig zu verlassen, aber unter Abänderung des vorher streng betonten monophyletischen Standpunktes, schlägt ihr Begründer Klaatsch in allerjüngster Zeit (1910a und b) ganz neue Gedankengänge ein. Er kam zu diesen außerordentlich kühnen und revolutionären Ideen durch eingehendes Studium des Aurignac-Fundes. Dieses Skelett zeigt gegen das der Neandertalspezies deutliche und scharfe Unterschiede, so daß beide sicher nicht zusammengehören. Die Unterschiede findet nun Klaatsch derart, daß viele osteologische Eigentümlichkeiten des Aurignacmenschen, wie die Schlankheit der Extremitätenknochen, ihre grazilen Epiphysenenden, dann eine Anzahl Einzelheiten (ovaler Humeruskopf; Geradheit des Radius usw.) mehr oder weniger genau beim Orang sich wiederfinden, während die plumpen, schweren, gebogenen Formen der Neandertalgruppe denen des Gorilla gleichen. Klaatsch nimmt nun einen doppelten Ursprung an. Eine gemeinsame Urgruppe der Primaten, die in Gebiß und Proportionen menschlich war, aber noch keinen Menschenfuß hatte, etwa „Propithecanthrop" genannt werden könnte, sonderte sich in eine Anzahl von Zweigen nach verschiedenen Richtungen. Ein Westzweig ging ab und zerfiel in Prägorilloiden und Präneandertaloiden, ein Zerfall, der stattfand, ehe diese Prägorilloiden die starken Eckzähne erwarben, die aus ihnen Gorillas machten. Als selbständigen Zweig jener Urgruppe betrachtet Klaatsch weiter die Australier, die einen der älteren Zweige bildeten, der früh in Australien isoliert wurde. Ein

Ostzweig ging weiter ab, die Aurignac-Orangoiden bildend. Vermittelnde Zweige werden ebenfalls entstanden sein, Schimpanse und Hylobates zeugen davon. Gerade die Gibbons haben viel Ursprüngliches bewahrt; Klaatsch möchte geradezu eine gibbonoide Unterschicht annehmen, deren etwa fossil erhaltene Ausläufer dann sehr vormenschenähnlich aussehen müssen, vielleicht gehöre Pithecanthropus hierher. Die Frage nach dessen Natur dürfe dann eigentlich nur die sein, welchem Zweige des Vormenschen er sich anschließt, und da neigt Klaatsch dazu, ihn wegen Gesamtform und Einzelheiten des Femur zum orangoiden Oststrom in Beziehung zu bringen. Der Unterkiefer von Mauer dagegen könnte seiner Derbheit wegen vielleicht doch in die Vorfahrenreihe des Neandertalers gehören, seine gibbonoide Gesamtform wäre dann nur primitiver Vorfahrecharakter. Die Schimpansenbahn muß sich als Präschimpansoiden vom Weststrom abgezweigt haben, ehe Gorilla und Neandertaler sich trennten.

Endlich möchte Klaatsch auch die heutigen Menschenrassen einbeziehen. Er glaubt an Afrikanegern gorilloide und neandertaloide Merkmale zu finden, stellt sie also zum Weststrom. Aber es könnten wohl auch frühere Formen abgezweigt sein, so die Mikronegroiden (negroide Pygmäen), die vielleicht schimpansoide Merkmale in die afrikanische Menschheit gebracht haben.

Der Oststrom ist insofern etwas anders wie der Weststrom, als in ihm die beiden Formen, Aurignac — Orang viel weiter auseinanderwichen durch stärkere Abänderung und Degeneration des Orang. Nur tief unten gehören sie zusammen. Trotzdem hielten sich bei den Menschen Südostasiens orangoide Merkmale; Malayen und die älteren Schichten (Senoi usw.) müssen daraufhin untersucht werden.

Endlich glaubt Klaatsch nachweisen zu können, daß diluvial die menschlichen Teile je des Ost- und Weststromes in Europa aufeinander trafen. In Krapina kann man Zeichen des Kampfes finden, auch beide Typen nebeneinander. Und dann scheint es Klaatsch ausgeschlossen, daß nicht Mischung sollte eingetreten sein. Er glaubt im Fossilfund von Chancelade solche Bastardformen zu erkennen und stellt es als künftige Aufgabe hin, die verschmolzenen und gemischten Charaktere in den neolithischen und frühhistorischen Skelettresten Europas wieder zu finden.

Diese Ausführungen Klaatschs sind allerjüngsten Datums und noch wenig diskutiert. Ihre Annahme hängt wohl davon ab, ob wirklich die Aehnlichkeiten und Gleichheiten in osteologischen Merkmalen der Extremitäten und z. T. des Schädels, die doch alle funktionell so leicht ihre Erklärung finden, derart sicher als Beweise für einheitlichen Ursprung gelten können, daß alle anderen Aehnlichkeiten im Gesamtbau des Menschen (Haut; Haar; Lippen; Serumaufbau [Reaktion]; Gehirn; Psychisches usw) nichts dagegen bewiesen, vielmehr Konvergenzerscheinungen sind! Diese Einwände wurden von v. Bälz, Fischer, Mollison erhoben (Klaatsch 1910 b); sie scheinen unwiderleglich, Klaatschs Ansichten sind nicht haltbar.

Angeregt wurde Klaatsch zu seinen neuen Gedanken durch Melchers (1911), der eine Anzahl anatomischer Details beibringt, um zu zeigen, daß schon bei Lemuren eine Vierteilung vorhanden sei, aus der vier Formen, je getrennt, nämlich die vier Anthropoiden entstanden: aus der Gorillawurzel Neandertaler und Großneger; aus der Schimpansenwurzel der Heidelberger-, der Moustier-Mensch und die negroiden Pygmäen; aus der Orangwurzel der Aurignacmensch und die Indoaustralier; aus der Gibbonwurzel der Pithecanthropus und die Mongolen. Dabei werden dann die vier Anthropoidenwurzeln über Lemuren direkt an Makis angeschlossen; die Merkmale (Knochenbau; Genitalapparat; Ohr usw.) sind ziemlich aphoristisch zusammengestellt.

So ganz neu sind derartige polyphyletische Gedanken nicht; auch die geographische Anordnung ist schon vertreten worden, und zwar von G. Sergi. Aber die eingehende Begründung, die Belegung mit Einzelangaben, Beobachtungen und Behauptungen, die Klaatschs Hypothese fruchtbar und anregend machen, auch ohne daß sie sich halten wird, fehlen hier.

G. Sergi (1908, 1909) nimmt folgende Entstehung an: von Lemuren kommen die Grundformen der Catarrhinen und aus diesen ein anthropomorpher Typus, der sich in 4 Aeste spaltet, 1. einen europäischen, 2. einen amerikanischen, 3. einen afrikanischen und 4. einen asiatischen. Aus dem europäischen entstehen 3 Genera: Dryopithecus, Pliopithecus und Palaeanthropus. Während jene beiden ausstarben, entwickelten sich aus dem Palaeonthropus wieder 3 Spezies: a) Homo europaeus (= Neandertalgruppe einschließlich der dolichocephalen Krapinaindividuen); b) Homo krapinensis (= brachycephaler Krapina-Schädel) und c) Homo heidelbergensis. Alle sind ausgestorben. Aus dem amerikanischen Zweig entsteht Archaeanthropus und daraus Homo pampaeus (Ameghino), die ebenfalls ausgestorben sind. Aus dem afrikanischen Stamm entstehen Gorilla, Schimpanse und Notanthropus, aus diesen wieder Homo afrus (afer).

Er entfaltet sich reich und läßt 4 Spezies entstehen. a) Homo eurafricanus, der als Varietäten den Homo nordicus, mediterraneus, africanus, polynesianus, australianus usw. besitzt; b) Homo sudanensis mit Varietäten; c) Pygmaeus africus und d) Pygmaeus oceanicus. Dann hat 4. der asiatische Stamm 5 Genera: a) Orang; b) Pithecanthropus; c) Palaeopithecus; d) Hylobates; e) Heoanthropus, aus dem der Homo asiaticus mit seinen Varietäten entsprang, während b und c ausstarben. Die Berechtigung, die geographisch getrennten und anthropologisch z. T. sehr differenten Formen als eigene Spezies aufzufassen, sucht Sergi vor allem durch den Hinweis auf ähnliches Verhalten bei Elephas und anderen Formen darzutun.

Im Gegensatz zu diesen polyphyletischen Theorieen, aber in anderen Punkten wesensverwandt, stehen Kollmans (1905, 1907, 1909) Ansichten allen diesen gegenüber. Auch er schiebt — das ist das Charakteristische seiner Ansicht — das Aeffische der Anthropoiden und damit das Anthropoidenähnliche der primitiven Menschen als nicht genealogisch-nahe beiseite.

Er geht von der Tatsache aus, daß die Jugendformen der Anthropoiden mit ihren runden, gewölbten, gratfreien Schädeln dem jugendlichen und erwachsenen Menschen mehr gleichen als erwachsene Großaffen. Er deutet das phylogenetisch und nimmt an, daß die Ausgangsform einen hochgewölbten Schädel hatte ohne Vorbauten, also eine Art Urmensch, nicht Uraffe war; von da aus entstanden durch sekundäre Bestialisierung die Affen, und nach anderer Seite unter weiterer Entfaltung des Schädels der Urmensch. Die Anthropoiden stammen also sozusagen vom Menschen ab, nicht umgekehrt. Indem er davon ausgeht, daß sehr oft „kleine" Formen die phylogenetisch (paläontologisch) älteren sind, und der Meinung ist, daß von neolithischer Zeit an bei allen heutigen Rassen „Kleine", also Pygmäenstämme, nachgewiesen seien, nimmt Kollman an, daß jene erst entstandenen Menschen Pygmäen waren, mit stark gewölbtem Schädel. Durch Mutation seien selbständig aus einzelnen solchen Pygmäenrassen die „Großen" entstanden. Auch die Neandertalrasse sei sekundär, ihre Augenschirme usw. sekundär ins Tierische gehende Ererbungen; Pithecanthropus liege ganz abseits, sei ein Gibbon.

Als Zeugnis für die bedeutsame Rolle, die die Pygmäen gespielt haben sollen, wird auf die primitive Natur heutiger Pygmäen hingewiesen. Dem schließt sich W. Schmidt (1910) an, der eine ausführliche Beschreibung der Pygmäen, vor allem ihrer geistigen Seite bringt und sie als an der Menschheit Wurzel stehend dartun will. Zwingende Beweise fehlen aber.

Die gründlichste endlich, weil auf breitestem und folgerichtig erarbeitetem Tatsachenmaterial aufgebaute Theorie für die spezielle Entstehungslinie des Menschen gibt Schwalbe. Sie weicht von den Haekkelschen Versuchen nicht prinzipiell ab, nur ist dort alles mehr geahnt, hier im einzelnen ausgearbeitet.

Vom Uranthropoidenzustand zum Menschen wird die Lücke zunächst rein morphologisch, nicht genealogisch, aufs schönste ausgefüllt, und zwar tief unten, ganz nahe bei den Affenahnen durch den Unterkiefer von Mauer. Ihn möchte Schwalbe (1909) „einem Wesen zuschreiben, welches einer von anthropoiden Formen sich abzweigenden, zum Menschen führenden Reihe angehört, die nunmehr von der zu den jetzt lebenden Anthropoiden führenden Formreihe divergiert." Dabei hält er nahe Beziehungen zu Pithecanthropus für gar nicht ausgeschlossen. Dieser steht formal in jener Lücke ebenfalls noch nahe den Anthropoidenwurzeln, der ganze Individuenkreis, der als Homo primigenius bezeichnet wird (wie 1898 Wilser zuerst vorschlug; also Neandertal, Spy, Krapina, Le Moustier, Chapelle aux Saints usw.), steht in ihr höher, näher zum rezenten Menschen. Daß die Formenreihe wirklich so vorhanden ist, das erhärten nun Schwalbes Arbeiten aufs beste. Er hat zuerst ziffernmäßig das ausgedrückt, was schon eine große Anzahl Autoren gesehen hatte, die eigentümlichen Sondermerkmale jener Funde (vgl. die Anatomie in dem Artikel „Fossile Hominiden"). Seine Ziffern zeigen einwandfrei, daß der Pithecanthropusschädel der Affenvariationsbreite sehr nahe steht, sich von der Neandertalgruppe fern hält und daß andererseits diese wirklich einheitlich ist. In ihr variieren natürlich die Einzelindividuen. Mit Schwalbes Methode konnte dann eine Anzahl fraglicher Fossile und anderer Funde nach ihrer zoologischen Stellung präzisiert werden, teils als ganz ausscheidend und ohne jede phylogenetische Bedeutung, teils als der Neandertalgruppe etwas nähergerückte Formen (Uebergangsformen). Für das Extremitätenskelett haben Klaatsch und Fischer (1906) wichtige Ergänzungen gebracht. Klaatsch hat dann die neueren hierher gehörigen Funde kennen gelehrt. An der Eigenart der Funde, diesem rein anatomischen Resultat Schwalbes, ist wohl kein Zweifel möglich, und es dürfte als feststehend gelten, daß eine Formenreihe besteht. Aber die Frage, ob nun diese Formenreihe auch wirklich genea-

logisch ist, möchte Schwalbe selbst nicht sicher entscheiden. Seines späten Alters wegen (altdiluvial) kann wohl Pithecanthropus nicht direkter Vorfahr sein, er würde dann am Anfang der bipeden Bahn entstanden sein und sich, wenig verändert, so lange erhalten haben, während aus ihm nahen Formen der Mensch ward. Aehnliches, d. h. entsprechende Seitenstellung, könnte auch für die Neandertalgruppe gelten, aber hier weist Schwalbe selbst auf Walkhoffs (1903) Untersuchungen hin, der auf Grund der osteologischen Merkmale des Unterkiefers eine allmähliche kontinuierliche Fortentwickelung des Primigeniusmenschen in die Sapiensform annimmt. Der Mangel des Kinnes, die Grube als Ansatzstelle des Genioglossus, die nach hinten zunehmende Größe der Molaren, die Rückwärtskrümmung der Schneidezahnwurzeln verschwinden ganz allmählich, man findet in den verschiedenen paläolithischen Kiefern alle Uebergänge. Auf denselben Standpunkt stellt sich Gorjanovic-Kramberger (1906 und 1907), der in scharfem Gegensatz zu Adloff gerade auf Grund der Kinn- und Zahnbildung den Krapina- und Neandertalmenschen als direkten Vorfahr des rezenten, speziell europäisch-nordafrikanischen Menschen ansieht. Einzelne Formen des Krapinamenschen stellen diese vorher fehlenden Zwischenformen dar.

Endlich sind hier noch die sogenannten „Uebergangsformen" zu erwähnen. Schwalbe (1906) präzisiert auch deren Formwert, nachdem schon Klaatsch einige Untersuchungen darüber veröffentlicht hat. Rein morphologisch stellen sie deutlich eine Uebergangsreihe dar, und zwar in der Reihenfolge: Gibraltar, der noch fast ganz zur Neandertalgruppe gehört — Brüx — Galley-Hill — Brünn. Der Anatom kann nun dabei nichts finden, was nicht auch erlaubte, eine genealogische Linie in dieser Formenreihe zu sehen; eine gewisse Schwierigkeit macht der Umstand, daß der Fund von Galley-Hill geologisch der älteste sein soll, aus dem ältesten Quartär, älter als die Neandertalgruppe. Eine Nachprüfung wäre da erwünscht. Schwalbe neigt sehr dazu, trotzdem eine solche tatsächliche Reihe, also allmähliche Entwickelung, anzunehmen.

So würden uns also die nun so oft genannten fossilen Formen entweder die leibhaftigen Vorfahren oder aber Geschöpfe darstellen, die jeweils von solchen Vorfahren, ohne selbst viel verändert zu sein, etwas seitwärts abwichen; auch dann lehrten sie uns also jene Vorfahren formal kennen. Stärker abgewichen wären von den gemeinsamen Ahnen die fossilen und noch stärker die jüngeren, also heutigen Anthropoiden; hier kann nur genaue vergleichende Formanalyse uns noch alte Vorfahrenmerkmale kennen lehren. Die Bahn aber, die über alle jene Vorfahren führte, wäre einheitlich.

Der Gegensatz zu Klaatschs Theorie ist ziemlich scharf, wenn auch beide Ansichten einander nicht unüberbrückbar gegenüberstehen. Die vielseitigste Stütze durch das größte und best durchgearbeitete Tatsachenmaterial und daher die größte innere Wahrscheinlichkeit und meiste Aussicht auf allgemeine Anerkennung hat m. E. die Schwalbesche Theorie.

4. Ursachen, Art und Weise der Menschwerdung. Mag die phylogenetische Reihe gewesen sein, wie sie will, wir haben uns als Ausgangspunkt ein primatoides Geschöpf vorzustellen, also eine Form mit Kletterfüßen, mit halbaufrechter Körperhaltung, mit primitivem, nicht spezialisierten Gebiß. Welche Umformungen erlitt sein Körper und durch welche Faktoren waren diese bedingt? Man darf als sicher annehmen, daß zunächst der „Fuß" geworden sein muß. Man muß sich also denken, daß äußere Umstände die betreffende Form zwangen, das Kletterleben, Waldleben aufzugeben (geologisch-klimatische Aenderungen; allmählicher Waldschwund). Solche Uebergänge sind bei Primaten wohl mehrfach erzwungen worden, die Paviane z. B. sind dadurch wieder richtige Quadrupeden geworden, deren Beine trotz Beibehaltung der Hände sich osteologisch in manchem als Gangbeine verraten. Warum die zum Menschen führende Form statt aus der halbaufrechten Stellung sich niederzusenken, umgekehrt sich vollends aufrichtete, wissen wir nicht. Es muß primär in etwas nicht auf die Hinterhand Bezüglichem gelegen sein (Nahrungserwerb?). Durch den versuchten Gang wird die mechanische Beanspruchung anders und die Extremität reagiert darauf. Die Ansicht, die zuerst Schoetensack (1901), dann Klaatsch (1901) aussprach, daß das Klettern auf hohe Baumstämme durch Anpressen des inneren Fußrandes das Fußgewölbe hervorrief, hat keine Anerkennung gefunden.

Jede von der einfachen quadrupeden Lokomotion befreite Extremität weicht in ihrer Länge von der der verwandten quadrupeden Form ab (Känguruhs; Springmäuse; Tarsius; Dinosaurier; Hangelarme der Gibbons usw.). So wurde namentlich die hintere Extremität jener Form länger; es bahnte sich der aufrechte Gang an. All das kann also von der klimatisch-geologisch erzwungenen Aufgabe des eigentlichen Ur- und Hochwaldlebens abhängig gedacht werden. Ist der Beginn des aufrechten Ganges gegeben, so muß sich notwendig eine große Menge statisch mechanischer Anpassungen ausbilden. Da entstand das Fußgewölbe, dann die Ausbildung der Tibia als Hauptstütze

(Parallelerscheinungen bei Vögeln und Huftieren), die Entfaltung der Waden- und Gesäßmuskeln; weiter wurden andere Anforderungen an den Rumpf gestellt, die Lendenlordose, das Promontorium, die festere Einfügung der Wirbelsäule ins Becken, d. h. das große Sacrum, wurden nötig, große Beckenschaufeln mußten die Eingeweidelast tragen helfen. Sehr früh muß auch der äussere Schwanz geschwunden sein, wie die Uebereinstimmung aller Anthropoiden zeigt; aber wir können uns kausale Momente nicht vorstellen. Jetzt erst, bei aufrechter Wirbelsäulenstellung konnte der Kopf ohne großen Bänder- und Muskelapparat balanziert werden (Verlagerung der Condyli occipitales), jetzt erst konnte also sein Gewicht ohne Beeinträchtigung seiner Beweglichkeit so stark vermehrt werden, wie es das Menschenhirn verlangte (vgl. Bandapparat und Größe der Brustwirbeldorne bei Hornträgern und Muskelentfaltung und Größe der Halswirbeldorne bei kieferschweren Anthropoiden). Damit ist also gesagt, daß zuerst der aufrechte Gang und dann erst die Gehirnentfaltung erlangt wurde; Schwalbe (1904) weist darauf hin, wie in der Tat Pithecanthropus, der nur erst die Bahn zum Menschen hin beschritt, ein menschlich ausgebildetes Femur, wahrscheinlich aufrechten Gang, aber noch ein recht kleines Gehirn hatte. Auch diese Gehirnentfaltung ging aus jenem Wechsel der Umwelt hervor. Er mußte einen Nahrungswechsel bedingen. Flora und Fauna wurden ja anders; er mußte neue Konkurrenten und wirkliche Feinde bringen, so daß durch all dies die Anforderungen an die Hirnfunktionen gewaltig wuchsen (Aufmerksamkeit; Vorsicht; List; Intelligenz). Auch daß das Balanzieren, der Gebrauch der Vorderextremität zum Fangen, zum Werfen, zum Schlagen neue Bahnen brauchten, vermehrte Koordination, da die alten nicht aufgegeben wurden, könnte Hirnvergrößerung gebracht haben. Morris (Man and his Ancester New York 1902) erwähnt, daß im Gegensatz zu anderen Tierordnungen bei Affen fast alle Genera intelligente Formen sind, so daß die Ausgangsstufe für diese Hirnentwickelung schon gleich anfangs relativ hoch entwickelt war. Cunningham (Journ. Anthr. Inst. 1902) weist darauf hin, wie spät sich ontogenetisch im Vergleich zu den Rindenzentren für Armbewegung das Zentrum für die Sprache ausbildet, und deutet diese Erscheinung phylogenetisch.

Waren diese Dinge alle gegeben, so kamen sekundär die anderen minder wichtigen. Die Handmuskulatur spezialisierte sich vollends, eine Anzahl sonstiger Muskeln wurden abgeändert (vgl. Wiedersheim). Die Nase entwickelte sich, und zwar die innere zurück und die äußere spezifisch menschlich: Parallelerscheinung beim Nasenaffen, aber Bildung nicht genau homolog Wiedersheim), wobei wir uns ohne kausale Erklärung bescheiden müssen. Auch über den Verlust des Haarkleides und die Erhaltung oder Ausbildung der spezifisch menschlichen Haare können wir nur als mögliche Erklärung auf geschlechtliche Auslese hinweisen, was schon Darwin (1871) tat. In dieselbe Richtung fällt wohl die Ausbildung der Lippen, vielleicht die des weiblichen Busens. Daß auch Nachteile entstanden bei diesen vielen Umänderungen der Organisation, ist selbstverständlich, und nicht alle wurden ausgemerzt, es sei die exponierte Vorderseite des Bauches, die Neigung zu Leistenbrüchen erwähnt.

Ebenso mußten sich alle möglichen Triebe, Gewohnheiten usw. ändern, verlieren oder neubilden; es kann hier nicht auf die Frage nach der Entstehung der menschlichen Eheformen, der Staatenbildung usw. eingegangen werden. Auf die bei diesem Werdegang erlangte hohe Ausbildung der geistigen Fähigkeiten soll aber besonders hingewiesen werden, ebenso auf die Tatsache, daß diese in ihren Grundzügen sowohl, wie in allen den Details, worin sie sich bei irgend welchen Menschen vom Affen unterscheiden, stets auch allen Menschen gemeinsam sind, daß erst die letzten, feinsten und kompliziertesten psychischen Züge und damit die geistige Leistungsfähigkeit auch rassenmäßig verschieden verteilt sind.

Erst als all das einigermaßen fixiert war, dürfte die Sonderung in Rassen eingetreten sein, wobei die ersten großen Scheidungen offenbar sehr weit zurückreichen (vgl. den Artikel „Rassenbildung“).

5. Zeit und Ort der Menschwerdung. Aus obigen Ergebnissen aller Untersuchungen der Primatenentstehung und der Ausgestaltung des Primatenstammes ergibt sich als zoologisch einwandfrei begründete Folgerung, daß der Mensch im oder mindestens am Ende des Tertiär entstanden sein muß. Aber das ist auch alles, was man sicher behaupten kann. Schon über die Frage nach der Zugehörigkeit zu bestimmten tertiären Stufen ist keine Einigkeit erzielt, ob alt- oder jungtertiär, steht nicht fest; die Unstimmigkeit ergibt sich aus der dargestellten Verschiedenheit der Ansicht über den menschlichen Stammbaum. Sicherheit würden einwandfreie Funde geben, und zwar solche von Resten des menschlichen Körpers und solche von menschlichen Manufakten, die geologisch datierbar wären.

Der älteste stratigraphisch beglaubigte Fund ist der Unterkiefer von Mauer bei Heidelberg, aus den alleruntersten diluvialen, zum Oberpliocän Beziehungen habenden Schichten (mit Rhinoceros etruscus, Equus Stenonis usw. vgl. Schoetensack 1908).

Ueber die ältesten Artefacte herrscht der denkbar größte Streit.

Es handelt sich um die Frage, ob Feuersteine, die in pliocänen und miocänen, ja oligocänen Schichten (besonders Frankreichs) gefunden sind

und an ihrer Oberfläche „Absplisse", „Sprünge", „Schlagmarken", „Retouchen" zeigen, „Artefakte" d. h. menschliche „Manufakte" oder „Isifakte" (Naturprodukte) sind. Man nennt die Steine „Archäolithen" und „Eolithen". Die Frage ist noch völlig ungeklärt. Zuletzt hat P. Sarasin (1909) gezeigt, daß die Brandung an der Seeküste völlig einwandfreie „Eolithen" zustande bringen könne. Man muß daher seinen Schluß billigen:

„Im Hinblick auf die Möglichkeit einer natürlichen Entstehung der sedimentären Eolithen ist die Behauptung, daß sie menschliche Artefacte darstellten, nicht bewiesen." Die Möglichkeit aber muß zugegeben werden; die hilft freilich zur Lösung unseres Problems noch nichts, d. h. wir haben keinerlei Funde, die uns das wirkliche Alter der Menschen bezeugen (Ueber das Eolithenproblem vgl. Klaatsch 1905. 1908; Rutot 1904; P. Sarasin 1909; Verworn 1905).

Ueber den Ort der Menschwerdung gilt auch heute noch das Darwinsche Wort, daß es zwecklos sei, darüber nachzugrübeln. Tatsächlich hat man alle Kontinente dafür in Anspruch genommen. Daß Ameghino Südamerika, Sergi Afrika, Schoetensack Australien als Urheimat erweisen wollten, sei kurz erwähnt. Wirklich diskutierbar ist wohl nur die viel geteilte Meinung, daß irgendwo zwischen Indien und Madagaskar (oder Ostafrika), also etwa im Sundaarchipel (oder dem vorhergehenden Festland) die Heimat zu suchen sei, wofür Haeckel und viele andere eintreten, oder die Wilsersche (1907) Idee, daß die heutige Arctica, die im Tertiär warm war, die Ausgangsstelle wie der Tierwelt überhaupt, so der Primaten und des Menschen war. Eine Diskussion würde hier zu weit führen, auch darüber liegt also wie über so mancher Frage der Anthropogenese vorläufig noch Dunkel.

Literatur. ***P. Adloff,*** *Das Gebiß des Menschen und der Anthropomorphen. Berlin 1908.* — ***F. Ameghino,*** *Le Diprothomo Platensis. Anal. Mus. Nacion. de Buenos Aires T. 19 1909 (dort frühere Literatur).* — ***W. Branca,*** *Der Stand unserer Kenntnisse vom fossilen Menschen. Leipzig 1910.* — ***A. J. B. v. d. Broek,*** *Ueber einige anatomische Merkmale von Ateles usw. Anat. Anz. Bd. 33 1908 (Literatur über Ateles).* — ***Ch. Darwin,*** *The Descent of man and on Selection in Relation to Sex. London 1871.* — ***E. Fischer,*** *Zur Entwickelungsgeschichte des Affenschädels. Zeitschr. Morph. Anthr. Bd. 5 1903.* — ***Derselbe,*** *Das Primordialcranium von Tarsius spectrum. K. Acad. v. d. Wetensch. Amsterdnm 1905.* — ***Derselbe,*** *Die Variationen an Radius und Ulna des Menschen. Zeitschr. Morph. Anthr. Bd. 9 1906.* — ***H. Friedenthal,*** *Ueber einen experimentellen Nachweis von Blutverwandtschaft. Arch. f. Anat. und Phys. Jahrg. 1900.* — ***Derselbe,*** *Beiträge zur Naturgeschichte des Menschen I—V. Jena 1910.* — ***Gorjanović-Kramberger,*** *Der diluviale Mensch von Krapina (14 Taf. 277 S.). Wiesbaden 1906.* — ***Derselbe,*** *Die Kronen und Wurzeln des Homo primigenius etc. Anat. Anz. Bd. 31 1907 (hier Literatur zur Diskussion mit Adloff).* — ***E. Haeckel,*** *Anthropogenie 5. Aufl. Leipzig 1903.* — ***A. A. W. Hubrecht,*** *Die Säugetierontogenese in ihrer Bedeutung für die Phylogenie der Wirbeltiere. Jena 1909 (hier alle früheren Arbeiten des Verfassers).* — ***H. Klaatsch,*** *Mehrere zusammenfassende kritische Darstellungen vom Stand der Lehre der fossilen menschl. Reste Ergebnisse der Anat. u. Entwickelungsgeschichte Bd. 9 10 12 17 (hier die ganze Literatur).* — ***Derselbe,*** *Entstehung und Entwickelung des Menschengeschlechts. In „Weltall und Menschheit" Berlin-Leipzig 1901/02.* — ***Derselbe,*** *Die tertiären Silexartefacte aus den subvulkanischen Sanden des Cantal. Arch. f. Anthr. N. F. Bd. 36 1905.* — ***Derselbe,*** *Die Steinartefacte der Australier und Tasmanier verglichen mit denen der Urzeit Europas. Zeitschr. f. Ethnol. 1908.* — ***Derselbe,*** *Das Gesichtsskelet der Neandertalrasse und die Australier. Verhandl. Anat. Ges. 27. Vers. Berlin 1908.* — ***Derselbe,*** *The Skull of the Australian Aboriginal. Rep. Pathol. Labor. New S. Wales Vol. I Pt. 3 Sydney 1908.* — ***Derselbe,*** *Die Aurignac-Rasse und ihre Stellung im Stammbaum der Menschheit. Zeitschr. f. Ethnol. Bd. 42 1910 [a].* — ***Derselbe,*** *Menschenrassen und Menschenaffen. Korrespbl. deutsch. anthr. Ges. 41 1910 [b].* — ***T. H. F. Kohlbrugge,*** *Die morphologische Abstammung des Menschen. Stuttgart 1908.* — ***J. Kollmann,*** *Neue Gedanken über das alte Problem von der Abstammung des Menschen. Correspbl. deutsch. Anthr. Ges. 1905.* — ***Derselbe,*** *Die Neandertal-Spy Gruppe. Bericht über die Prähistorikerversammlung. Köln 1907.* — ***Derselbe,*** *Kleine Menschenformen unter den Eingeborenenstämmen von Amerika. Verh. des 16. internat. Amerikanisten Kongr. Wien 1909.* — ***R. Lehmann-Nitsche,*** *Nouvelles recherches sur la Formation pampéenne et l'homme fossile de la Republique argentine. Rev. Mus. de la Plata T. 14 Buenos-Aires 1907.* — ***N. C. Macnamara,*** *Beweisschrift betreffend die gemeinsame Abstammung des Menschen und der anthropoiden Affen. Arch. Anthr. N. F. Bd. 3 1905.* — ***F. Melchers,*** *Zur Naturgeschichte der Menschenrassen. Polit.-anthrop. Revue Bd. 9 1911.* — ***G. Rutot,*** *Le préhistorique dans l'Europe centrale. Namur 1904 und zahlreiche Aufsätze in Bull. Soc. d'Anthr. de Bruxelles und Bull. Soc. Belge de Géol.* — ***P. Sarasin,*** *Einige Bemerkungen zur Eolithologie. Jahresber. d. geogr.-ethnogr. Ges. in Zürich 1909.* — ***M. Schlosser,*** *Beitrag zur Osteologie und systematischen Stellung der Gattung Necrolemur, sowie zur Stammesgeschichte der Primaten überhaupt. Neues Jahrb. Miner. Geol. und Pal. Festband 1907 (hier palaeontologische Literatur).* — ***Derselbe,*** *Ueber einige fossile Säugetiere aus dem Oligocaen von Aegypten. Zool. Anz. Bd. 35 1910.* — ***Derselbe,*** *Grundzüge der Palaeontologie v. K. v. Zittel neubearbeitet von Broili, Koken und Schlosser. München-Berlin 1911.* — ***W. Schmidt,*** *Die Stellung der Pygmaeenvölker in der Entwickelungsgeschichte des Menschen. Stuttgart 1910.* — ***O. Schoetensack,*** *Der Unterkiefer des Homo Heidelbergensis. 13 Tafeln. Leipzig 1908.* — ***Derselbe,*** *Die Bedeutung Australiens für die Heranbildung des Menschen aus einer niederen Form. Verhandl. naturhist.-med. Ver. Heidelberg 1901.* — ***G. Schwalbe,***

Studien über Pithecanthropus erectus Dubois. Zeitschr. Morph. Anthr. Bd. 1 1899. — **Derselbe,** *Der Neanderthalschädel. Bonner Jahrbücher 1901.* — **Derselbe,** *Die Vorgeschichte des Menschen. Braunschweig 1904.* — **Derselbe,** *Studien zur Vorgeschichte des Menschen. Sonderheft zur Zeitsch. Morph. Anthr. Stuttgart 1906 (Schädel von Brüx u. a.).* — **Derselbe,** *Ueber fossile Primaten und ihre Bedeutung für die Vorgeschichte des Menschen. Mitt. d. philomat. Ges. in Elsaß-Lothr. Bd. 41 1908.* — **Derselbe,** *Ueber Darwins Werk „Die Abstammung des Menschen". Zeitschr. Morph. Anthr. Bd. 12 1909.* — **Derselbe,** *Studien zur Morphologie der südamerikanischen Primatenformen. Zeitschr. Morph. Anthr. Bd. 13 1910.* — **Sergi,** *Europa. Torino 1908.* — **Derselbe,** *L'apologia del mio poligenismo. Atti Soc. Rom Antr. Vol. 15 1909.* — **Uhlenhuth,** *Ein neuer biologischer Beweis für die Blutsverwandtschaft zwischen Menschen- und Affengeschlecht. Arch. Rassen- und Gesellsch. Biol. Bd. 1 1904.* — **Derselbe,** *Ueber die Entwickelung und den jetzigen Stand der biologischen Blutdifferenzierung Beih. zur Med. Klinik H. 9 1907.* — **M. Verworn,** *Die archaeolithische Cultur in den Hipparionschichten von Aurillac (Cantal). Abh. K. Ges. d. Wiss. Göttingen. Math. phys. Kl. 4 1905.* — **Walkhoff,** *Die diluvialen menschlichen Kiefer Belgiens und ihre pithecoiden Eigenschaften (Selenka, Menschenaffen VI). Wiesbaden 1903.* — **M. Weber,** *Die Säugetiere. Jena 1904 (Literatur über Primaten u. a.).* — **R. Wiedersheim,** *Der Bau des Menschen als Zeugnis seiner Vergangenheit 4. Aufl. Tübingen 1908.* — **L. Wilser,** *Menschwerdung. Stuttgart 1907 (hier die früheren Arbeiten des Verfassers).* — **Wortman,** *Studies of Eocene Mammalia in the Marsh Collection Peabody Museum Pt. II Primates Am. Journ. of Science Vol. 15 1903.* — **Derselbe,** *On the Affinities of the Lemuridae ebenda Vol. 17 1904.*

E. Fischer.

Anthropologie.

1. Begriff der Anthropologie. 2. Einteilung der Anthropologie: a) Allgemeine Anthropologie; b) Spezielle oder systematische Anthropologie; c) Die Anthropographie. 3. Einteilung der Literatur. Geschichte. Gesellschaften und Zeitschriften.

1. Begriff der Anthropologie. Anthropologie umgreift heute nach deutschem Sprachgebrauch nur die Naturgeschichte des Menschen, die kulturelle Seite wird von anderen Disziplinen bearbeitet.

Anthropologie mit rein philosophischem Inhalt, wie bei Kant und anderen, oder identisch mit menschlicher Anatomie ist nicht mehr Brauch. In England und Amerika dagegen wird Anthropologie meist in einem allgemeineren Sinne gefaßt, als die Lehre vom gesamten Wesen des Menschen, dem körperlichen und geistigen; sie schließt dort also auch noch die Lehre vom geistigen Leben der einzelnen sozialen Gruppen des Menschen (Völker, Stämme, soziale Schichten) mit ein, also Völkerkunde (Ethnologie; Ethnographie; Ergologie), Volkskunde (Folklore), Soziologie und anderes. Bei uns klingt dieser Brauch noch darin nach, daß man Gesellschaften und Zeitschriften, die alle diese Gebiete umfassen, „anthropologische" (offiziell oder in Abkürzung) nennt. Aber sonst ist bei uns, ebenso in Frankreich und den anderen Ländern, der Name Anthropologie auf die Untersuchungsergebnisse der Physis des Menschen, nicht der Psyche, beschränkt; man spricht gelegentlich, um das ausdrücklich anzudeuten, von somatischer oder physischer Anthropologie.

Der Begriff Anthropologie ist am besten und zuletzt von R. Martin definiert (1907). Er schließt sich ziemlich eng an P. Broca an. Danach ist Anthropologie die „Naturgeschichte der Hominiden in ihrer zeitlichen und räumlichen Ausdehnung. Damit soll festgelegt sein", so fährt Martin fort, „1. daß die Anthropologie eine Gruppenwissenschaft ist, daß also die Individualwissenschaften, wie Anatomie, Physiologie usw. aus ihrem Rahmen ausgeschlossen sind; 2. daß sie sich nur mit der Physis dieser Formen beschäftigt und 3. daß sie den ganzen Formenkreis der Hominiden ohne jede Einschränkung umfaßt."

Tatsächlich muß die Anthropologie in diesem Sinne die ganze Primatengruppe berücksichtigen; nur in deren Rahmen läßt sich „der Mensch" verstehen nach Herkunft, systematischer Stellung und Morphologie. So ist die Anthropologie ein aus der Gesamtzoologie ausgeschnittenes und wegen des großen Interesses und der intensiven Bearbeitung, die ihrem Objekt zuteil werden, selbständig gewordenes Kapitel der Zoologie. Daraus ergibt sich die scharfe und deutliche Abgrenzung gegen benachbarte Disziplinen, die neben diesem Unterschied im Inhalt auch durch den in der Methode gegeben ist. Was auch vom geistigen Leben mit naturwissenschaftlichen Methoden zu erfassen ist, wie vergleichende experimentelle Psychologie usw., die naturwissenschaftliche Seite der Soziologie (Sozialanthropologie), gehört mit herein, das andere gehört in die Kulturwissenschaft, wie S. Graebner (1911) ausgeführt hat, der die „Methode der Ethnologie" sehr klar darlegt und als eine „historische" erweisen will.

Natürlich bleiben enge Beziehungen zu diesen Nachbarwissenschaften bestehen, ihre Resultate dienen der Anthropologie als Anregungen, eröffnen neue Probleme, geben für anthropologisch gesicherte Resultate willkommene Ergänzung, wie sie ihrerseits von der Anthropologie genau dasselbe erfahren, so die Ethnologie, die vergleichende Sprachwissenschaft, Geschichte, Vorgeschichte, Soziologie usw.

2. Einteilung der Anthropologie. Das große Gebiet der Anthropologie kann folgendermaßen eingeteilt werden, wobei Martins (1907) Einteilung zugrunde gelegt ist (sie schließt sich an E. Schmidt

Lehmann-Nitsche, Mason u. a. an). Die Anthropologie zerfällt in allgemeine und spezielle oder systematische Anthropologie.

2a) Die allgemeine Anthropologie behandelt die allgemeinen biologischen Probleme für den Menschen (Hominidengruppe), also Variabilität, Vererbung, Selektion usw.; sodann die Phylogenese der Primaten und Hominiden, die Anthropogenese, deren Faktoren, Weg, Ort und Zeit, die Ausprägungsformen der Hominiden (fossile); weiter die Rassenbildung, die Rassenmischung und den Rassentod; endlich die Wechselwirkung zwischen der Gesamtheit der Individuen einer sozialen Gruppe und dem Schicksal der Gruppe selbst (Rasse und Familie; Rasse und soziale Schicht; Rasse und Staat), also Sozialanthropologie.

2b) Die spezielle oder systematische Anthropologie betrachtet die Anatomie, Physiologie (einschließlich der phsyiologischen Psychologie) und Pathologie vom anthropologischen Standpunkt aus; sie beschreibt und erläutert also die einzelnen Organsysteme und ihre normale und pathologische Tätigkeit. Daß dabei einzelne Kapitel besonders in den Vordergrund treten, so die äußere Körperform (Größe; Proportionen; Physiognomie), Kraniologie (Schädellehre), Haar und Haut, ist prinzipiell ohne Bedeutung; daß dabei nicht nur menschliche Rassenanatomie, sondern Hominidenmorphologie getrieben wird, ist nach obigen Ausführungen klar. Neben diese beiden Teile tritt

2c) Die Anthropographie (Martin), d. h. die synthetische Behandlung, die rein deskriptive Darstellung aller einzelnen Gruppen (ausgestorbene und lebende Spezies; Varietäten; Rassen oder Unterrassen usw.), woran sich allgemeine Fragen über Rassengeographie und Rassensystematik reihen.

3. **Einteilung der Literatur. Geschichte. Gesellschaften und Zeitschriften.** Gleichzeitig schlägt Martin (1908) eine entsprechende Einteilung der Literatur vor, und es wäre sehr zu wünschen, daß sie, wie die zoologische, zur Durchführung käme. Im übrigen sei, was die reiche Literatur angeht, auf die unten zitierten wichtigsten Zeitschriften verwiesen.

Eine Geschichte der Anthropologie soll hier nicht gegeben werden. Es sei erwähnt, daß sich natürlich schon von den griechischen Klassikern an anthropologische Angaben zerstreut in der Literatur finden, daß aber erst am Ende des achtzehnten Jahrhunderts eigentliche anthropologische Arbeiten einsetzen (Buffon † 1788; dann Blumenbach De varietate hominum 1775). Erst 1859 gründete P. Broca die erste, dauernde, anthropologische Gesellschaft in Paris; dazu traten 1863 die zu London, 1869 die zu Berlin. Um diese Zeit erschienen zahlreiche kraniologische Arbeiten; 1842 führt A. Retzius die „Index"betrachtung ein. Der Aufschwung der vergleichenden Anatomie wirkte auch auf die Anthropologie befruchtend; aber erst die Schwalbesche Untersuchung des Pithecanthropus (1899) und des Neandertalschädels (1901) brachten die anthropogenetischen Fragen in neuen Fluß. Die letzten zwanzig Jahre endlich sehen die Sozialanthropologie, den jüngsten Zweig der Anthropologie, sich entfalten.

Heute hat Frankreich 9 ordentliche Lehrstühle der Anthropologie, Italien deren eine sehr große Zahl, Deutschland zwei. Eigene anthropologische Laboratorien im deutschen Gebiet haben München, Berlin, Zürich, Breslau und Freiburg i. B.; Sammlungen gibt es eine große Anzahl (vgl. Kataloge der Sammlungen im Suppl. zu Arch. f. Anthrop.). Von Gesellschaften seien erwähnt: die Deutsche Gesellschaft für Anthropologie, Ethnologie und Urgeschichte und die Berliner Gesellschaft für Anthropologie, Ethnologie und Urgeschichte; die Wiener anthropologische Gesellschaft; das Royal Anthropological Institut of Great Britain and Ireland in London, die Société d'Anthropologie de Paris; die Società Romana di Anthropologia in Rom usw.

Die wichtigsten Zeitschriften sind: Das Archiv für Anthropologie (Braunschweig) seit 1866; Korrespondenzblatt der deutschen Anthropologischen Gesellschaft (Braunschweig) seit 1870; die Zeitschrift für Ethnologie (Berlin) seit 1869; das Anthropologische Centralblatt (Braunschweig) seit 1895; der Anthropologische Literaturbericht in Schwalbes Jahresbericht für Anatomie (Jena) seit 1896; das Archiv für Rassen- und Gesellschafts-Biologie (Leipzig) seit 1904; die Politisch-anthropologische Revue seit 1902; die Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris seit 1860; das Journal of the Royal Anthropological Institut seit 1872; die Mitteilungen der Wiener anthropologischen Gesellschaft seit 1870; L'Anthropologie seit 1889; das Archivio per l'Antropologia e la Etnologia seit 1870; die Atti della Società Romana antropologica seit 1894 und zahlreiche kleinere.

Literatur. ***R. Martin,*** *System der (physischen) Anthropologie und anthropologischen Bibliographie. Anthr. Correspbl. 38 1907 S. 105 (hier ist die ganze Literatur angegeben).* — ***P. W. Schmidt,*** *Die moderne Ethnologie. Anthropos Bd. 1 1906 S. 134 (besonders nach der ethnographischen Seite).* — ***F. Graebner,*** *Methode der Ethnologie. Heidelberg 1911.* — *Lehrbücher:* ***Topinard,*** *Éléments d'anthropologie générale. Paris 1885.* — ***Frassetto,*** *Lezioni di Antropologia (Bd. I u. II; weitere folgen). Rom 1909/10.* — *Alles andere ist populär — Ein Lehrbuch von R. Martin wird voraussichtlich 1912 erscheinen.*

E. Fischer.

Antiklinale

bezeichnet das von einem Punkt der Erdoberfläche nach dem Erdinnern hin entgegengesetzte Fallen der Schichten. Das Gegen-

teil ist die Synklinale (vgl. den Artikel „Schichtenbau").

Apophysen

sind die kleineren Verzweigungen von Gesteins- und Mineralgängen (vgl. den Artikel „Lagerungsform der Gesteine").

Appun

Anton.

Geboren am 20. Juni 1839 in Hanau, gestorben ebenda am 13. Januar 1900. Er war Organist an der französischen Kirche in Hanau und ist Verfasser mehrerer akustischer Abhandlungen. Die Schwingungszahl hoher Pfeifen bestimmte er auf optischem Wege.

E. Drude.

Arachnoidea.

1. Morphologie und Physiologie: a) Chitinskelett. b) Körpergröße und Körperform. c) Gliederung des Rumpfes. d) Beine. e) Sinnesorgane. f) Atmungsorgane. g) Blutkreislauf. h) Mundwerkzeuge. i) Verdauungskanal. k) Exkretionsorgane. l) Geschlechtsorgane. m) Spinnorgane. — 2. Embryonalentwickelung. — 3. Geographische Verbreitung. — 4. Systematik: a) Scorpionida. b) Pseudoscorpionida. c) Solifuga. d) Pedipalpa. e) Araneida. f) Phalangida. g) Acarida. h) Pentastomata.

1. Morphologie und Physiologie. Die Arachnoiden oder Spinnentiere sind landbewohnende, seltener sekundär im Wasser lebende Gliederfüßer. Sie unterscheiden sich von allen anderen Landarthropoden dadurch, daß das erste Gliedmaßenpaar nicht in Form von Fühlern, sondern von Mundwerkzeugen und zwar von zwei- bis dreigliedrigen, meist scherenförmigen Organen zur Ausbildung gelangt ist, daß fast immer vier Beinpaare und daß oft blätterförmige, durch Stigmen nach außen ausmündende Atmungsorgane vorhanden sind. — Mit Einschluß der im Meere lebenden Limuliden und Pycnogoniden werden die Spinnentiere auch Chelicerata genannt, im Gegensatz zu den Landarthropoden mit entwickelten Fühlern, den Atelocerata.

1a) Chitinskelett. Als Gliederfüßer besitzen die Spinnentiere ein äußeres Chitinskelett, an das sich innerlich die Muskeln ansetzen. Das Chitinskelett wird durch eine Zellschicht, die sogenannten Hypodermis- oder Matrixzellen geliefert. Es bildet physiologisch nicht nur das Stütz- und Hebelwerk bei allen Bewegungen, sondern zugleich eine schützende Decke gegen äußere Eingriffe und gegen Austrocknung.

1b) Körpergröße und Körperform. Wie die anderen Landarthropoden, so besitzen auch die Spinnentiere eine durchschnittlich geringe Körpergröße: Die Länge des Körpers ohne die Anhänge schwankt beim ausgewachsenen Tiere zwischen 0,01 und 7 cm, während sie bei Landwirbeltieren zwischen 1,5 und 300 cm schwankt. Da die Fühler der Insekten physiologisch als Tastorgane aufzufassen sind, bei den Spinnentieren aber die Fühler fehlen, tritt die Tastfunktion am vorderen Körperende offenbar zurück und dieser physiologischen Eigenschaft entspricht die Lebensweise der Spinnentiere: Es sind meist Tiere von geringerer Ortsbewegung. Nur in einzelnen Gruppen wird die Beweglichkeit größer. Dann treten die Maxillarpalpen oder die Vorderfüße als Tastorgane stark nach vorn heraus, um die fehlenden Fühler zu ersetzen.

1c) Gliederung des Rumpfes. Die Gliederung des Rumpfes ist unvollkommener als bei den Insekten. Nur am Hinterleibe ist sie oft noch vorhanden (Arthrogastra). Bisweilen fehlt sie gänzlich. Stets ist der Körperteil, der das erste Beinpaar trägt, unbeweglich mit dem Kopfe verbunden. Man nennt die verschmolzenen vorderen Körperringe Kopfbrust oder Cephalothorax. Das Verschmelzen der Körpersegmente hängt, wie das Fehlen der Fühler mit der trägeren Lebensweise zusammen; denn bei den lebhaftesten Spinnentieren, den Solifugen, kommt es am wenigsten zum Ausdruck.

1d) Beine. Die fast durchweg vorhandene Achtzahl der Beine ist höher, als sie bei Landarthropoden zum Gehen und Klettern unbedingt erforderlich ist. Das zeigen uns die Insekten mit 6 Beinen. Physiologisch erklärt sich, wie wir in den einzelnen Gruppen sehen werden, die höhere Zahl dadurch, daß die Beine meist weitere Funktionen als das Gehen und Klettern übernehmen müssen. Mit diesen weiteren Funktionen hängt es auch zusammen, daß die Zahl der Beinglieder in vielen Fällen größer ist als bei den Insekten. Während dort von der Wurzel an gerechnet ein Hüftglied (Coxa), ein oder zwei Schenkelringe (Trochanter), ein Schenkel (Femur), eine Schiene (Tibia) und ein meist mehrgliedriger Fuß (Tarsus) unterschieden werden (Fig. 1), tritt bei den Spinnentieren zwischen dem Schenkel und der Schiene oft noch ein Knieglied (Patella) auf (vgl. Fig. 24). Der Fuß ist meist zweigliedrig und am Ende mit 1 bis 3 Krallen versehen. Das erste Fußglied wird auch Metatarsus (Protarsus oder Basitarsus), das letzte Tarsus im engeren Sinne (oder Telotarsus), die Krallen mit dem oft vorhandenen Haftapparat, dem Pulvillus werden, namentlich wenn das Ganze als Glied abgegrenzt ist, Onychidium (oder Prätarsus) genannt. Flugorgane fehlen stets.

1e) Sinnesorgane. Die Augen der Spinnentiere sind stets einfach, nie zusammengesetzt wie die Facettenaugen der Insekten. Sie sind oft in der Achtzahl vorhanden und stehen mehr oder weniger auf Höckern, so daß die Achsen nach verschiedenen Seiten gerichtet sind. Durch die größere Zahl und die Stellung ist also ein durch die fehlende Beweglichkeit des Kopfes gegebener Mangel ersetzt. Bei Tieren, die nächtlich oder gar unterirdisch und in Höhlen leben, treten die Augen natürlich, anderen Sinnesorganen gegenüber, mehr oder weniger zurück. Bei beweglichen Tagtieren (wie den Springspinnen) sind die am vorderen Kopfrande stehenden Augen groß.

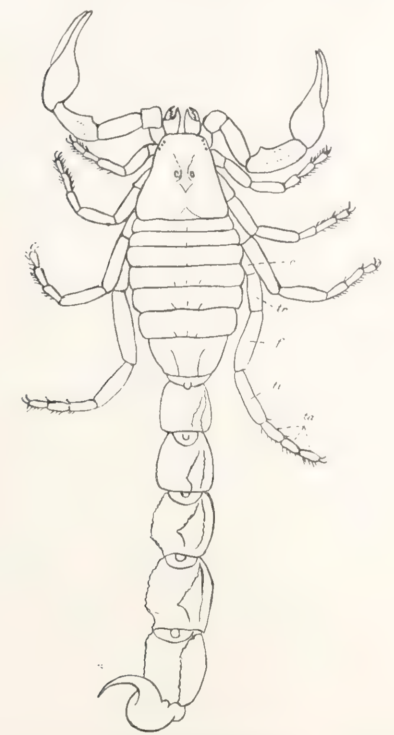


Fig. 1. Dickschwanzskorpion, Buthus australis. Rückenseite. c Coxa; tr Trochanter; f Femur; ti Tibia; ta Tarsenglieder.

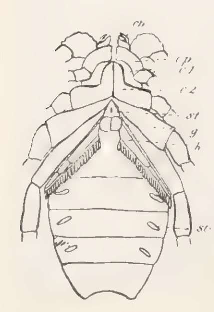


Fig. 2. Bauchseite des Skorpions. ch Cheliceren; c. p. Coxa der Palpen; c 1 und c 2 Coxa des 1. und 2. Beinpaares; st Sternum; g Geschlechtsplatten; k Kamm; sti Stigmen.

Der histologische Aufbau ist nicht bei allen Spinnenaugen gleich. Zwei Formen treten auf, die man als Hauptaugen oder invertierte Augen und Nebenaugen oder konvertierte Augen unterscheidet (Fig. 3 und 4). Ueber die Verschiedenheit der Funktion herrscht noch nicht völlige Klarheit. Soviel steht jedenfalls fest, daß die sogenannten mit Augenmuskeln versehenen Hauptaugen stets zur Anwendung kommen, wenn ein deutliches Bild von einem Gegenstand erforderlich ist, während die oft nach hinten und nach den Seiten gerichteten Nebenaugen wohl besonders Bewegungen oder hell und dunkel unterscheiden lassen. Eine Springspinne, die ein genießbares Tier von einem ungenießbaren unterscheiden will, richtet stets die Achsen der Hauptaugen auf dieses Tier.

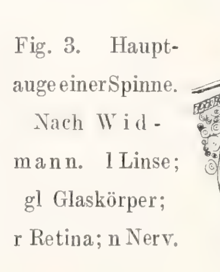


Fig. 3. Hauptauge einer Spinne. Nach Widmann. l Linse; gl Glaskörper; r Retina; n Nerv.

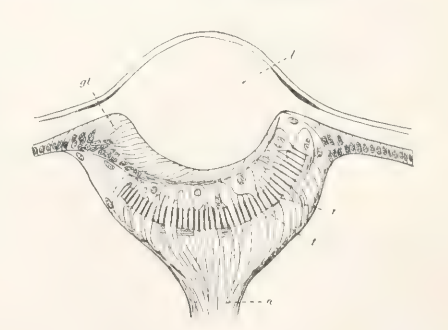


Fig. 4. Nebenauge einer Spinne. t Tapetum.

Außer den Augen treten bei den Spinnentieren als Sinnesorgane besonders die Tastnervenendigungen in den Vordergrund. Man findet sie zahlreich an den Enden der Beine, namentlich dann, wenn diese als Fühler ausgebildet sind. Da die Oberfläche des Körpers meist mit mehr oder weniger anliegenden Haaren, zum Schutze gegen Nässe, bedeckt ist, müssen Tastorgane, wenn sie ihre Funktion erfüllen sollen, natürlich aus dieser Haardecke heraustreten. In der Tat sind, namentlich an den exponierten Stellen des Körpers, Haare vorhanden, die sich schon äußerlich durch ihre steile Stellung auszeichnen (Fig. 5 t) und an die gut ausgebildete Nervenendigungen herantreten. Diese Haare sind also als Tasthaare aufzufassen. Außer den Tasthaaren tritt bei den Spinnentieren

noch eine zweite Form von Sinneshaaren auf (Fig. 6), die sich durch ihre äußerst bewegliche Einlenkung im Grunde eines kleinen Chitinnäpfchens, ferner durch ihre Feinheit und durch ihre oft äußerst regelmäßige Längenabstufung (Fig. 5 h) von den Tasthaaren unterscheiden. Man hat ihnen, da sie oft keineswegs an exponierten Körperstellen stehen und beispielsweise an den als Fühler dienenden Vorderbeinen der Tarantuliden ganz fehlen, eine höhere Funktion als den Tasthaaren zugeschrieben und sie als Organe gedeutet, die Luftbewegungen zur Wahrnehmung bringen. Einerseits mag es sich darum handeln, einen leichten Windhauch, wie er bei Annäherung eines Feindes entsteht, erkennen zu lassen, andererseits handelt es sich wohl sicher auch um die Wahrnehmung von Tönen und Geräuschen. Die regelmäßige Längenabstufung spricht für die zuletzt genannte Funktion. Und diese Deutung wird durch zwei Tatsachen bestätigt. Erstens sieht man die längeren der genannten Haare unter dem Mikroskop (bei 600 facher Vergrößerung), sobald man einen tieferen Ton auf der Geige anstreichen läßt, deutlich in Schwingungen geraten und zweitens konnte man bei Wolfspinnen beobachten, daß sie dem Brummton einer Fliege nachgingen, auch dann, wenn sie die Fliege nicht sehen konnten. Nach der wahrscheinlichen Funktion der genannten Haare hat man sie Hörhaare genannt. Ohne Rücksicht auf die Funktion nannte man die Näpfchen Trichobothrien, die Haare Bothriotrichien.

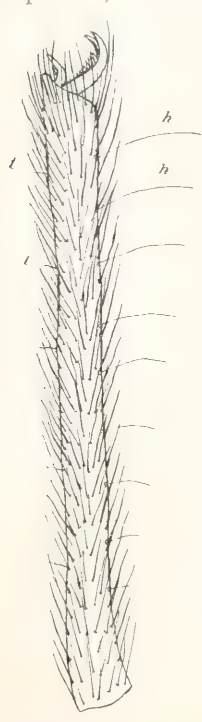
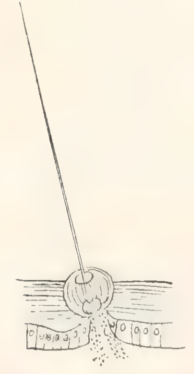


Fig. 5. Fuß einer Spinne. h Hörhaare; t Tasthaare.


Fig. 6. Hörhaar einer Spinne.

Noch eine dritte Art von Sinnesnervenendigungen hat man bei den Spinnentieren beobachtet. Es sind das eigenartige spaltförmige Vertiefungen der Chitinhaut, die namentlich an den Beinen auftreten (vgl. Fig. 32 ly). Man hat diese Spalten, an die Nervenendigungen herantreten, lyraförmige Organe genannt und ist über ihre Funktion noch im unklaren. Da Geruchswahrnehmungen bei Spinnentieren sicher festgestellt sind, wird es sich vielleicht um Geruchsorgane handeln.

Das Zentralnervensystem besitzt bei den Spinnentieren in seiner Hauptmasse, wie bei allen Arthropoden, eine möglichst geschützte Lage, indem es sich im untersten Teil des Körpers, über der Bauchwand befindet. Nur der vordere Teil, aus dem die Augennerven entspringen, liegt über dem Verdauungskanal. Der verschiedenen Körperform entsprechend ist das Zentralnervensystem mehr oder weniger konzentriert. Bei den langgestreckten Skorpionen schließt sich an das untere Schlundganglion, wie bei anderen Arthropoden, eine Ganglienkette an. Meist ist aber nur eine untere Schlundganglienmasse vorhanden (Fig. 10 u. s.).

11) Atmungsorgane. Als Atmungsorgane treten bei den Spinnentieren, wie schon oben angedeutet wurde, vielfach sogenannte Fächertracheen oder Lungen auf. Die Fächertracheen, eine Form der Atmungsorgane, die wir sonst im Tierreiche nicht kennen, bestehen aus Blättern, die, wie die Blätter eines zusammengeklappten Fächers nebeneinander liegen (Fig. 7). Da in diesen Blättern das Blut zirkuliert und zwischen sie atmosphärische Luft von außen durch Stigmenöffnungen eintritt, kann ein Austausch der Gase stattfinden. Neben den Fächertracheen treten oft auch Röhrentracheen (Fig. 8) auf, ähnlich denen, die wir bei den Insekten kennen. Die feinen Röhrchen werden meist, wie dort, durch eine spiralige Verdickung der Chitinwand gespannt erhalten. Der Luftwechsel in den Röhren wird vielleicht durch gewisse dorsoventrale Muskeln des Körpers bewirkt. Aeußerlich erkennbar sind die Atembewegungen gewöhnlich nicht. Bei

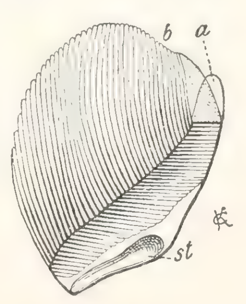


Fig. 7. Fächertrachee einer Spinne. Nach Bertkau. b die Blätter derselben, a das letzte Blatt, st Stigma.

sehr kleinen Spinnentieren fehlen Atmungsorgane bisweilen gänzlich. Es besorgt dann die äußere Körperhaut den Gasaustausch. Sind Atmungsorgane vorhanden, so stehen die Stigmen meist in Paaren und sind segmental angeordnet (Fig. 2). Sie können an allen Körpersegmenten vorkommen, beschränken sich aber stets auf eins oder wenige Segmente.



Fig. 8. Röhrentracheen einer Spinne. Nach Bertkau. st Stigma.

1g) Blutkreislauf. Der Blutkreislauf entspricht im allgemeinen den Atmungsorganen und ist wie diese in verschiedener Weise ausgebildet. Bei Spinnentieren, die ausschließlich Röhrentracheen besitzen, ist oft nur ein pulsierendes Rückengefäß mit seitlichen Spaltöffnungen oder Ostien vorhanden. Dieses Rückengefäß oder Herz (Fig. 9) setzt sich vorn als Aorta mindestens bis zum Gehirn fort. Im übrigen vollzieht sich der Kreislauf in langsamer Bewegung durch lakunäre Räume, die sich zwischen den verschiedenen Geweben

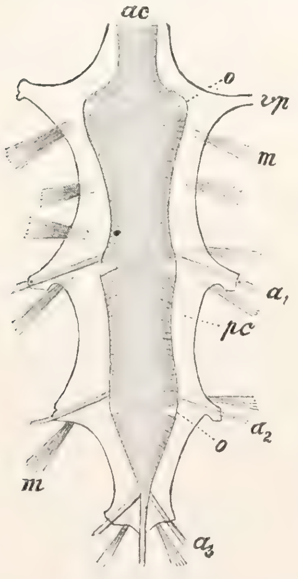


Fig. 9. Herz einer Spinne. Nach Schimkewitsch. a_1, a_2, a_3 Seitengefäße, aa hinteres Gefäß, ac Aorta, m Muskeln, o Ostien, pc Pericardium, vp Vena pulmonaris.

befinden und durch Bindegewebe äußerlich mehr oder weniger abgeschlossen sind. Spinnentiere, die nur Fächertracheen besitzen, sind mit einem etwas vollkommeneren Gefäßsystem ausgestattet. Vor allem führen dann stets Gefäße vom Herzen zu den Lungen. Der Gasaustausch mittels der Röhrentracheen scheint aber trotz des damit verbundenen unvollkommeneren Kreislaufs der vollkommenere zu sein; denn bei lebhaften Tieren walten Röhrentracheen vor. Die Fächertracheen sind also, wie der ganze Bau der Spinnentiere, das Zeichen einer im Vergleich zu den Insekten ursprünglich wenig beweglichen Lebensweise.

1h) Mundwerkzeuge. Wie die Atmung so ist auch die Nahrungsaufnahme bei den meisten Spinnentieren eine andere als bei den Insekten. Schon die Form der Mundwerkzeuge läßt dies erkennen. Das vordere Mundgliedmaßenpaar, die Cheliceren oder Mandibeln, auch Kieferfühler genannt, sind zwei- bis mehrgliedrig und oft scherenförmig (Fig. 1). Die Scheren dienen, wie man sich durch Beobachtung überzeugt, dazu, die Nahrung schon außerhalb des Mundes entweder fein zu zerkleinern oder auszupressen, um sie dann erst dem Munde zuzuführen. Sind keine Scheren vorhanden, wie bei den Spinnen, so wird die Beute extraoral reichlich eingespeichelt und die Nährstoffe werden

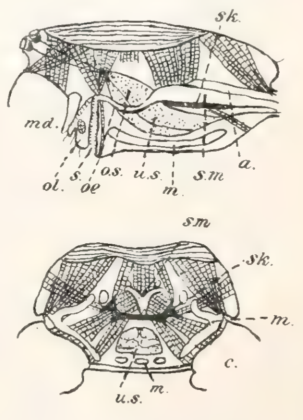


Fig. 10. Längsschnitt und Querschnitt des Cephalothorax einer Radnetzspinne, a. Aorta; c. Coxa; m. Blindschläuche des Magens; oe. Oesophagus; ol. Oberlippe; o.s. oberes Schlundganglion; s. Pharynx; sk. Entosternit; s.m. Saugmagen; u.s. unteres Schlundganglion.

dann aufgesogen. Die Grundglieder des zweiten Gliedmaßenpaares, die Maxillen oder Scherenkiefer (Fig. 2 cp), dienen dazu, die Nahrung dem Ende des Saugapparates, dem Rostrum zuzuführen.

1i) Verdauungskanal. Der erste Teil des Verdauungskanals, an dem man den Pharynx (Fig. 10 s), den Oesophagus (oe) und den Saugmagen (sm) unterscheidet, bildet stets ein Pumpwerk. Strahlenförmige Muskeln bewirken eine Erweiterung und ringförmige Muskeln eine Verengung (Fig. 12). In den vorderen Teil des Verdauungskanals einmündende Speicheldrüsen kennt man bei den Spinnentieren nicht. Ein umfangreiches Organ, das den größten Teil des Körpers einnimmt und früher als Leber gedeutet wurde, hat sich als ein, meist reichverzweigter, Darmteil erwiesen. Die hohen Zellen, die dessen Verzweigungen umkleiden, nehmen die Nahrungs-

bestandteile in sich auf. Auf noch ein Organ muß hingewiesen werden, das außer den Spinnentieren nur noch einigen Krebsen zukommt, auf das sogenannte Entosternit (Fig. 10 sk). Es ist das eine Skelettbildung im Innern des Cephalothorax. Es liegt zwischen dem Nervensystem und dem Verdauungskanal. Da es nicht nur für die basalen Beinglieder Muskelansätze liefert, sondern auch mit der Rückenwand des Cephalothorax durch Muskeln verbunden ist, dient es offenbar dazu, den oberen Teil des Cephalothorax zu verengen. Diese Verengung trifft die Aorta, die Röhrentracheen und den Saugmagen und

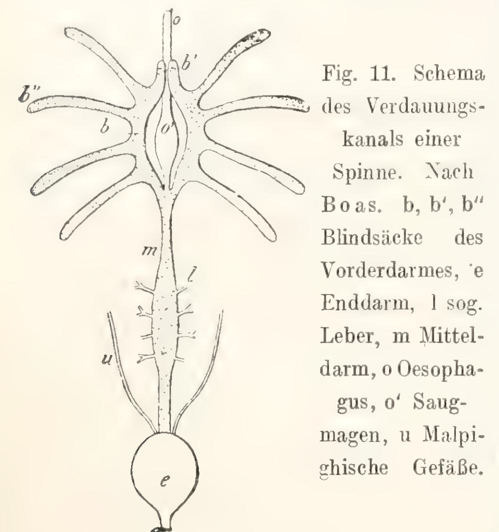


Fig. 11. Schema des Verdauungskanals einer Spinne. Nach Boas. b, b', b'' Blindsäcke des Vorderdarmes, e Enddarm, l sog. Leber, m Mitteldarm, o Oesophagus, o' Saugmagen, u Malpighische Gefäße.

mag für alle diese Organe ihre Bedeutung haben. Da die Ringmuskeln des Saugmagens zurücktreten, wenn diese Muskeln stärker werden (Radnetzspinnen Fig. 10), so ist

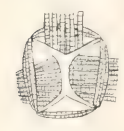


Fig. 12. Saugmagen von Tarantula. Nach Börner.

anzunehmen, daß sie besonders die Saugmuskeln unterstützen.

1k) Exkretionsorgane. Als Exkretionsorgane oder Nieren kommen bei den Spinnentieren wieder zweierlei Organe vor, oft beide nebeneinander, Coxaldrüsen und Malpighische Gefäße. Die Coxaldrüsen münden an der Wurzel der Hüfte des 3., seltener auch des 1. Beinpaares nach außen. Oft ist eine kleine Drüse ohne Gang vorhanden. Die meist in der Zweizahl vorkommenden Malpighischen Gefäße münden gewöhnlich in den Anfang des Enddarms. Nach ihrem Bau zu urteilen, sind sie kaum als mit den Malpighischen Gefäßen der Insekten homolog zu betrachten.

1l) Geschlechtsorgane. Die Mündung der Geschlechtsorgane befindet sich bei den Spinnentieren an der Bauchseite des Körpers, meist in der Nähe der Wurzel des Abdomens (Fig. 2 g). Auch darin unterscheiden sich die Spinnentiere von den meisten andern Landarthropoden. Da das Ende des Abdomens bei den Spinnentieren oft in anderer Weise Verwendung findet, ist an dieser Stelle dann für die Geschlechtsöffnung kein Platz vorhanden und wir dürfen wohl annehmen, daß ursprünglich bei allen Spinnentieren das Hinterleibsende, wie jetzt noch bei den echten Spinnen und bei den Skorpionen anderweitig besetzt war. Sonst wäre es völlig unverständlich, daß nicht wenigstens bei einigen Formen, die keine derartigen Organe besitzen, die Kopulationsorgane an das Hinterende des Körpers gerückt sind. Bei den Landtieren ist das Hinterende des Körpers zweifellos die geeignetste Stelle für die äußern Geschlechtsorgane. Durch die Lage derselben an der Wurzel des Abdomens wird die Kopulation entschieden erschwert und es sind deshalb oft Hilfsorgane erforderlich und vorhanden. Hoden und Ovarien kommen meist in der Zweizahl vor, schließen aber oft zu einem Ring oder gar strickleiterförmig zusammen. Das Weibchen besitzt meist 2 Samentaschen (receptacula seminis); außerdem sind vielfach Anhangdrüsen vorhanden.

1m) Spinnorgane. Mit den Geschlechtsorganen dürften die Spinnorgane, die den Spinnentieren ihren Namen gegeben haben, ursprünglich in physiologischer Beziehung stehen. Vielfach dienen diese Organe nur dazu, die Eier in einen Kokon einzuhüllen, und dem Körper anzuheften. In diesem Falle können sie sehr unvollkommen entwickelt sein und in der Nähe der Geschlechtsorgane auftreten. Andererseits können sie an fast allen Segmenten vom Vorderende bis zum Hinterende des Körpers vorkommen. Bei den Pseudo skorpionen münden sie am Ende der Cheliceren (Fig. 15 g), bei den Spinnmilben am Ende der Palpen, bei den Pedipalpen neben den Geschlechtsorganen und bei den Spinnen meist am Hinterende des Körpers.

2. Embryonalentwickelung. Die Embryonalentwickelung verläuft bei den verschiedenen Spinnentierordnungen recht verschieden. Schon bei der Eifurchung kommen sehr bedeutende Differenzen vor. Die im mütterlichen Körper sich vollziehende Entwickelung der Skorpione fügt sich am besten dem bekannten Schema. Die Eifurchung ist hier diskoidal. In allen anderen Fällen schwankt die Furchung zwischen einer totalen und einer superfizialen. Bei den Eiern einiger Milben finden zunächst Furchungen mit vollkommener Zellabschnürung statt. In den

allermeisten Fällen aber setzt die Entwickelung mit einer unvollkommenen totalen Furchung ein und die Zellen rücken erst nach einigen Teilungen an die Oberfläche, um ein vollkommenes Blastoderm zu bilden. Auch die Entodermbildung vollzieht sich nur bei den Skorpionen in normaler Weise. Bei allen anderen Spinnentieren ist die Entstehung des Darmes so unklar, daß man neuerdings das Auftreten eines besonderen Keimblattes, aus dem sich der Darm entwickelt, vollkommen in Abrede stellt und den Darm aus einer Anhäufung freier Dotterzellen hervorgehen läßt. Bei der Segmentierung oder Gliederung des Körpers tritt am Vorderkörper für das Prosoma (Cephalon), für jedes Mundgliedmaßenpaar und für die vier Beinpaare je ein besonderes Segment auf (Fig. 13). Eine mehr oder weniger deutliche Gliederung zeigt sich anfangs auch am Hinterkörper (Opisthosoma), obgleich der Hinterleib später oft nicht die geringste Gliederung erkennen läßt. Meist zeigen sich am

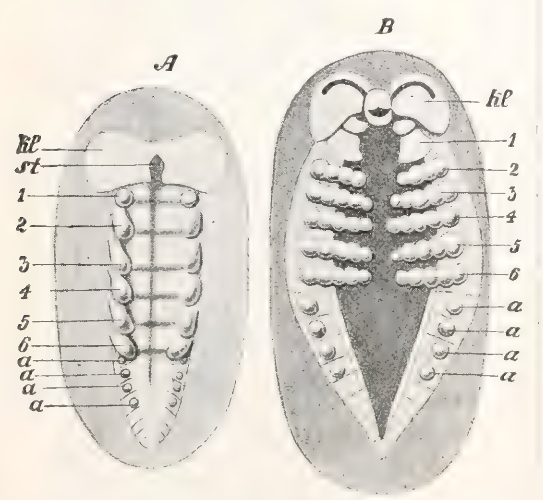


Fig. 13. Embryonalentwickelung einer Spinne. Aus Lang, Vergl. Anat. kl Kopflappen, 1 bis 6 die Gliedmaßenanlagen des Vorderkörpers, aa Gliedmaßenanlagen des Hinterkörpers.

Hinterleib nicht nur Segmente, sondern auch Gliedmaßenanlagen und diese stehen zu den späteren Atmungs- und Spinnorganen in engster Beziehung. Bemerkt sei, daß die Cheliceren, wie die Fühler der Insekten, erst im Laufe der Entwickelung vor den Mund rücken und daß sich bei den echten Spinnen das Segment der hinteren Atmungsorgane meist stark nach hinten streckt. so daß erst dadurch das hintere Stigmenpaar vor die Spinnwarzen zu liegen kommt. Während der Entstehung der Gliedmaßen tritt meist eine Umrollung des Körpers ein, so daß nach dieser Rollung der Rücken nach außen gerichtet ist.

Nach dem Ausschlüpfen des jungen Tieres aus dem Ei kommen stets noch mehrere Häutungen vor. Von einer eigentlichen Verwandlung aber kann gewöhnlich nicht die Rede sein. Nur bei der Mehrzahl der Milben unterscheidet sich das 1. Larvenstadium von den folgenden durch das Fehlen des 4. Beinpaares. Bisweilen schiebt sich bei Milben sogar ein beinloses Entwickelungsstadium ein. Die höheren Arachniden kommen stets mit allen vier Beinpaaren aus der Eihülle hervor. Im übrigen tritt aber auch bei ihnen erst nach der ersten Häutung, gleichzeitig mit dem Beginn der Nahrungsaufnahme, die definitive Ausbildung des Körpers zutage. Die Geschlechtsorgane nehmen erst bei der letzten Häutung ihre endgültige Form an.

3. Geographische Verbreitung. Die geographische Verbreitung der Spinnentiere ist, wie die mancher der anderen niederen Land- und Süßwassertiere scheinbar völlig regellos. Oft kommen die nächstverwandten Arten an geographisch weit voneinander entfernten Orten vor, ohne daß man eine Verschleppung annehmen dürfte. So gibt es, um nur einige Beispiele zu nennen, Gattungen oder Untergattungen, die einerseits im tropischen Amerika, andererseits in China und Japan (Trichonephila), die einerseits an der Südspitze von Südamerika, andererseits auf den Philippinen (Bigois) oder in Madagaskar (Archaeidae) vorkommen. Da manche Formenkreise dem tropischen Amerika, Afrika und Australien gemein sind, hat man, um deren Verbreitung zu erklären, frühere Landverbindungen dieser Kontinente angenommen.

Alle derartigen Hypothesen aber haben nicht ausgereicht, um die Tatsachen auch nur einigermaßen vollkommen zu erklären, so daß man sich neuerdings einer Theorie zuneigt, die auf keine Widersprüche zu stoßen scheint, der Reliktentheorie. Da Gruppen, die über die Tropen der Erde verbreitet sind (Hersiliidae) oder die jetzt nur auf Madagaskar und im südlichen Teil von Südamerika vorkommen (Archaeidae), im Bernstein Nordeuropas gefunden werden, nimmt man an, daß die regellos verbreiteten Formen früher, bei gleichmäßigeren Temperaturen, auf weite Strecken hin gleichmäßig verbreitet waren, und daß sich alle Formen von einem nördlichen Länderkomplex aus nach den drei Südspitzen der Kontinente hin verbreiteten und sich auf Grund der an verschiedenen Orten verschiedenen Lebensbedingungen nur hier und da bis auf die Gegenwart erhielten. Diese Theorie verwandelt also, sobald wir die Lebensbedingungen der einzelnen Tierarten kennen, die oben genannte scheinbare Regellosigkeit in eine Gesetzmäßigkeit. Um diese erkennen zu können, müssen wir freilich die Art des Vorkommens bei den einzelnen Arten genau kennen, müssen wissen, ob die Tiere auf Pflanzen, unter Steinen, auf feuchtem oder trockenem Boden usw. vorkommen. Berücksichtigt man diese ökologischen Tatsachen hinreichend, so kann man trotz der scheinbaren Regellosigkeit bei den Spinnentieren etwa sechs Hauptverbreitungsgebiete deutlich unterscheiden. Am meisten hebt sich das neotropische Gebiet ab mit den Centrurinen, Chactinen, Gonyleptiden, Platoriden, Senoculiden, Anyphaeninen, Micrathenen usw. Ihm schließt sich an das nearktische Gebiet, charakterisiert durch die Gattungen Uroctonus, Vejovis, Brachybothrium usw. Das nearktische Gebiet leitet zu dem paläarktischen über, charakterisiert durch die Euscorpiinen, Nemesien usw. Dem paläarktischen Gebiet nähert sich einer-

steis das **äthiopische** Gebiet, charakterisiert durch die Gattungen Pandinus, Babycurus, die Ammoxeniden, Harpactirinen usw. und andererseits das **orientalische** Gebiet, charakterisiert durch die Chaeriliden, Heterometren, Liphistiiden, Ornithoctoninen usw. Dem orientalischen Gebiet schließt sich das **australische** am nächsten an, charakterisiert durch die Urodacinen, Hadrotarsiden usw. Ein arktisches und antarktisches Gebiet lassen sich nicht auf Grund positiver Charaktere abgrenzen. Die Spinnentierfauna von Madagaskar und Neuseeland weichen von dem äthiopischen bzw. dem australischen Gebiete nicht mehr ab als andere Untergebiete voneinander.

4. **Systematik.** Die Klasse der Spinnentiere zerfällt in folgende Ordnungen:

I. Es sind gegliederte Beine vorhanden.

A. Die Palpen sind echte, mit Hörhaaren versehene Scheren; weitere Hörhaare fehlen.

a) Als Mundwerkzeuge wirken außer den Cheliceren die Grundglieder der Palpen und der beiden vorderen Beinpaare; der Hinterleib zerfällt in ein breites Präabdomen und ein schmales, am Ende mit einem Giftstachel versehenes Postabdomen; am 2. Abdominalsegmente befinden sich zwei kammförmige Tastorgane **Scorpionida.**

b) Außer den Cheliceren wirkt nur das Grund glied der Palpen als Kiefer; der Hinterleib zerfällt nicht in 2 Teile und trägt keinen Giftstachel und keine Kämme **Pseudoscorpionida.**

B. Die Palpen sind keine mit Hörhaaren besetzten Scheren.

a) Atmungsorgane sind sowohl am Vorder- als am Hinterkörper vorhanden; der Cephalothorax trägt nur die Mundwerkzeuge und das erste Beinpaar; die Palpen und das erste Beinpaar sind Tastorgane; die Mandibeln sind mächtig entwickelte Scheren; Hörhaare fehlen, aber Tasthaare sind mächtig entwickelt **Solifuga.**

b) Atmungsorgane befinden sich entweder nur am Vorder- oder nur am Hinterkörper oder sie fehlen ganz; zwischen dem 1. und 2. Beinpaar ist der Körper nicht deutlich gegliedert; die Cheliceren sind weniger entwickelt.

α) Hörhaare befinden sich entweder an allen Beinen oder doch an einem Beinpaare; der Vorder- und der Hinterkörper sind deutlich voneinander abgesetzt.

* Hörhaare befinden sich nur an den Beinen; der stets gegliederte Hinterleib sitzt dem Vorderkörper breit an und trägt keine Spinnwarzen **Pedipalpa.**

** Hörhaare sind auch an den Palpen vorhanden; der Hinterleib ist durch einen sehr dünnen Stiel mit dem Cephalothorax verbunden, meist ungegliedert und stets mit Spinnwarzen versehen **Araneida.**

β) Hörhaare fehlen entweder ganz oder sie befinden sich am Rumpfe; der Vorder- und Hinterkörper sind hinter dem letzten Beinpaare nicht oder wenig voneinander abgesetzt.

* Die Beine des 2. Paares sind verlängert und unterscheiden sich als Tastorgane auffallend von den beiden benachbarten Beinpaaren, fast immer sind sie, wie die Vorderbeine, nur mit einer Kralle versehen; die beiden Augen stehen, wenn sie vorhanden sind, median, meist zu beiden Seiten eines Hügels oder einer über die Mundwerkzeuge vorragenden Kapuze; der Körper ist stets deutlich gegliedert **Phalangida.**

** Die Beine des 2. Paares sind nicht oder nicht auffallend von den benachbarten Paaren verschieden und enden meist mit zwei Krallen; die Augen fehlen entweder ganz oder sie stehen am Seitenrande des Vorderkörpers; der Körper ist undeutlich gegliedert **Acarida.**

II. Gegliederte Beine sind nicht vorhanden.

A. Es besitzen höchstens zwei rudimentäre Extremitätenpaare und leben parasitisch **Pentastomata.**

B. Es besitzen vier Beinpaare und leben nicht parasitisch **Tardigrada.**

a) **Scorpionida** (**Ctenophora**) **Skorpione.** Da wir Skorpione schon aus dem Silur kennen, hält man die Skorpione vielfach für die ersten Spinnentiere, die auf der Erde auftraten. Wahrscheinlich bilden sie aber trotzdem nur einen Seitenzweig der Urform, da sie allen anderen Spinnentieren gegenüber viele Spezialcharaktere besitzen. Daß sie sich schon früh von den übrigen Spinnentieren abgesondert haben, macht besonders die abweichende Embryonalentwickelung im höchsten Grade wahrscheinlich. Im Gegensatz zu den anderen Spinnentieren ist die Furchung des Eies diskoidal und die Entodermbildung vollkommen. Außerdem treten die Genitalzellen schon sehr früh hervor und es sind 2 Embryonalhüllen vorhanden. Ist unsere Annahme richtig, so würden die Silurskorpione deshalb von den Urspinnentieren allein erhalten sein, weil sie einen so festen Chitinpanzer besaßen. Auffallend ist die geringe Veränderung, die die Skorpione in ihrem Bau seit jenen ältesten Zeiten erfahren haben. Die Konstanz wird nur dadurch verständlich, daß wir die gefährliche Giftwaffe der Skorpione in den Vordergrund der Betrachtung stellen. Gerade diese Waffe hat, wie ein Vergleich der Silurskorpione mit unseren jetzigen zeigt, eine weitgehende Vervollkommnung erfahren. Der Stachel ist viel spitzer und glatter geworden und die Blase, die die beiden getrennt mündenden Giftdrüsen enthält, ist größer als bei der Urform. Ein Tier, das mit einer derartigen Waffe ausgerüstet ist, bedarf keiner großen Beweglichkeit. Deshalb ist auch das Nahrungsbedürfnis bei den Skorpionen äußerst gering. Wie die Beobachtung lehrt, frißt der Skorpion selten und wenig, kann bis zu 9 Monaten hungern und nimmt seine Nahrung sehr langsam auf. Ein Mehlwurm wird beispielsweise von **Buthus occitanus** in etwa 8 Stunden verzehrt. Bei der Nahrungsaufnahme halten die Scheren der Maxillarpalpen die Beute fest. Die Cheliceren zerkleinern die Nähr-

stoffe und führen sie mit Hilfe der Maxillen in den Mund. Nach dem Mahl werden die Maxillarscheren an der dichtbehaarten Unterseite der Cheliceren gereinigt. Der Schwanz (Cauda, Postabdomen) wird bei den dickschwänzigen Formen über dem Rücken getragen. Der Stachel ist dann zur Verteidigung gegen einen Feind oder zur Hilfeleistung beim Angriff stets bereit. Seine Anwendung geschieht derart, daß die Cauda wie eine Peitsche vorgeschnellt wird. Der Stich ist auch für den Menschen nicht ungefährlich. Namentlich soll der in Nordafrika vorkommende Dickschwanzskorpion Buthus (Androctonus) australis (Fig. 1) Kindern und Frauen oft den Tod bringen. Daß die Angaben über Skorpionstiche den Tatsachen entsprechen, wird einerseits von bekannten Forschern und Aerzten bestätigt, andererseits aber durch Experimente, die man mit warmblütigen Tieren ausführte, indem man einige Tropfen des Giftes durch den Reiz des elektrischen Stromes dem Skorpion entzog und in die Blutbahnen des Versuchstieres überführte. Es zeigte sich, daß z. B. ein Hund von 15 bis 20 kg Körpergewicht durch 1 bis 1,5 mg Gift in 10 Stunden getötet wurde. Auf Frösche ist die Wirkung des Giftes geringer und Larven von Insekten mit vollkommener Verwandlung sollen ganz immun sein. Ob auch der Skorpion selbst immun ist, darin gehen die Ansichten noch auseinander. Die Angabe, daß sich der Skorpion selbst in der Gefahr töte, hat sich jedenfalls bei wissenschaftlicher Beobachtung nicht bestätigt. Ueber tödliche Stiche von Skorpionen wird besonders aus Nord- und Südafrika, aus Mexiko und von den Antillen berichtet. Bei den kleinen Arten Südeuropas (Euscorpius. Buthus) steht der Stich etwa einem Bienenstich gleich. Manche Skorpione (Heterometrus. Pandinus usw.) können, wie andere mit gefährlicher Giftwaffe ausgerüstete Tiere, ein Zischen hervorbringen. Dasselbe wird beim Skorpion durch einen Stridulationsapparat, bestehend aus 2 fein gekörnten oder behaarten Flächen, die sich an dem Hüftgliede des Maxillarpalpus und des ersten Beinpaares befinden, erzeugt. Als Atmungsorgane dienen den Skorpionen 4 Paare von Fächertracheen, die jederseits auf der Fläche der vier vorderen Bauchplatten ausmünden (Fig. 2 sti). Auch durch diese Stigmen unterscheiden sich die jetzt lebenden Skorpione von den Silurskorpionen.

An Sinnesorganen sind stets Augen vorhanden, wiewohl die Skorpione ausschließlich nächtlich auf Raub ausgehen. Die beiden Hauptaugen stehen zu den Seiten eines Hügels mitten auf dem Kopfe und 2 bis 5 Nebenaugen stehen an jedem der beiden Seitenränder. Mit Tasthaaren sind besonders die Endglieder der großen Palpenscheren ausgestattet. Zwischen diesen stehen die kürzeren, feinen Bothriotrichien, die bei den Skorpionen wohl nicht nur zum Hören, sondern auch zur Wahrnehmung eines jeden Lufthauchs dienen mögen. Zieht doch ein Skorpion, wenn er sich mit seinen Scheren tastend vorwärts bewegt, bei dem leisesten Hauch seine Scheren ein. Die 8 verhältnismäßig kurzen Beine, die den langen plumpen Körper zu tragen haben, sind weniger als die Scheren mit Tasthaaren ausgestattet. Die beiden vor der 1. Bauchplatte befindlichen, reich mit Nervenendigungen ausgestatteten Kämme sieht man beim Gehen in lebhafter, tastender Bewegung. Das Nervensystem besteht aus dem oberen und unteren Schlundganglion und einer Kette von Bauchganglien. Drei Ganglien liegen im Abdomen und 4 im Postabdomen. Als Schlupfwinkel wählen die Skorpione meist Höhlungen. Die flachsten Formen (Hormurus usw.) verbergen sich unter lockerer Rinde, die großen Tropenformen (z. B. Pandinus dictator) in hohlen Baumstämmen, die meisten aber, namentlich die in vegetationsarmen Gegenden vorkommenden Arten, unter Steinen. Manche Arten (Buthus occitanus, Opisthophthalmus usw.) graben selbst tiefe Röhren in den Boden. Sie stützen sich mit den Scheren und Hinterbeinen und führen mit den anderen Beinpaaren scharrende Bewegungen aus. Von Zeit zu Zeit schieben sie die gelockerten Erdmassen mit dem Schwanze zurück. Die Familien, in denen grabende Arten vorkommen, zeichnen sich durch eine reichere Bedornung, namentlich an den Beinen, aus.

Das reife Männchen unterscheidet sich von dem Weibchen besonders durch seine schlankere Körperform und schlankere Gliedmaßen. Der Paarung gehen gewisse Liebesspiele voraus, die darin bestehen, daß Männchen und Weibchen, die bis dahin stets getrennt vorkamen, zusammen allerlei Bewegungen ausführen, sich mit den Scheren fassen usw. Bei der Paarung selbst legen sich, wie man sicher beobachtet zu haben glaubt, die Tiere mit der Bauchseite aneinander, das Männchen mit der Bauchseite nach oben gekehrt. Sie halten sich dabei mit den Scheren aneinander fest. Vielleicht spielen auch die Kämme als Klammer- oder Tastorgane bei der Kopulation eine gewisse Rolle. Nach der Paarung wird das Männchen, wie bei vielen anderen Spinnentieren, wenn es nicht schleunigst das Weite sucht, vom Weibchen verzehrt. Daß der Körper des Männchens, nachdem dieses seine Aufgabe erfüllt hat, noch als Nahrung zur Erhaltung der Familie zur Geltung kommt, kann uns bei einem Raubtiere, das vielleicht nur einmal zur Fortpflanzung

schreitet, nicht überraschen. Bei den Skorpionen fällt diese Tatsache nur deshalb auf, weil ihnen sonst nur kleinere und schwächere Tiere zur Nahrung dienen. Die jungen Skorpione durchbrechen unmittelbar nach der Geburt die Eihülle, werden also gewissermaßen lebend geboren. Sie besteigen zunächst den Körper der Mutter, die ihnen dabei behilflich ist, indem sie ihnen die Schere vorhält. Nach der ersten Häutung, die in etwa 8 Tagen vor sich geht, zerstreuen sie sich und werden selbständig. Da der Skorpion in einem Jahre nur wenig größer wird und da man außerdem 5 verschiedene Größen in der Natur nebeneinander beobachtete, nimmt man an, daß er erst in etwa 5 Jahren erwachsen ist.

Man unterscheidet folgende Familien:

I. Das Sternum ist mindestens halb so lang wie breit.

A. Es sind jederseits 3 bis 5 Seitenaugen vorhanden.

a) Das Sternum ist fast dreieckig. Buthidae. Die Familie ist teils im neotropischen Gebiet (Centrurinae und Ananteris), teils in der alten Welt (Buthinae) zu Hause. Die Gattung Isometrus ist Kosmopolit.

b) Das Sternum ist nach vorn weniger verschmälert.

α) Am Grunde des Tarsenendgliedes steht nur ein Stachel in der Gelenkhaut Scorpioonidae. Die Gattungen dieser Familie sind teils neotropisch (Diplocentrus), teils mediterran (Nebo, Hemiscorpius), teils äthiopisch (Pandinus, Hadogenes, Opisthophthalmus), teils orientalisch (Heterometrus), teils von den Sundainseln bis Neu-Guinea verbreitet (Hormurus), teils australisch (Urodacus).

β) Am Grunde des Tarsus stehen zwei Stacheln in der Gelenkhaut. Vejovidae. Die Gattungen sind teils neotropisch (Hadruroides, Caraboctonus), teils nearktisch (Uroctonus, Anuroctonus, Vejovis, Hadrurus), teils mediterran (Jurus), teils indisch (Scorpiops).

B. Es sind nur 2 Augen jederseits vorhanden.

a) Hinter dem 2. Auge steht ein hellgelber Fleck. Chaerilidae. Die Familie ist nur orientalisch.

b) Hinter dem 2. Seitenauge steht kein hellgelber Fleck. Chactidae. Die Gattungen dieser Familie sind teils neotropisch (Chactinae), teils mexikanisch (Megacormus), teils mediterran (Euscorpius, Belisarius).

II. Das Sternum ist nicht halb so lang wie breit. Bothriuridae. Die Gattungen sind meist südamerikanisch. Nur eine Gattung (Cercophonius) ist australisch.

b) **Pseudoscorpionida** (Chelonethi. Chernetidae) **Pseudoskorpione.** Die Pseudoskorpione sind als verkümmerte Skorpione aufzufassen. Schon auf den ersten Blick erscheinen sie als solche; gibt es doch unter den echten Skorpionen einige Gattungen (Hormurus usw.), bei denen der Schwanz und der Schwanzstachel äußerst klein sind. Bei eingehender Untersuchung gewinnt diese Auffassung immer mehr an Wahrscheinlichkeit. Sie ist auch biologisch durchaus verständlich. In allen Tierklassen gibt es einzelne Formen, die äußerst klein sind und gerade auf Grund ihrer geringen Größe ihr Dasein fristen. Sie brauchen, weil sie kleiner sind, weniger Nahrung, werden wegen ihrer geringen Größe von vielen Raubtieren als Beute verschmäht und finden leicht einen Schlupfwinkel, in dem sie sich verbergen können. Wenn es Raubtiere sind, so können sie ihrer Beute in engere Höhlen folgen. Der auffallendste Unterschied zwischen Skorpionen und Pseudoskorpionen ist das Fehlen des Stachels bei diesen (Fig. 14). Es fehlen nicht etwa die sämtlichen Schwanzsegmente. Da die Pseudoskorpione 10 bis 11 Tergite besitzen, die Skorpione aber im Präabdomen nur 7, so ist in dem eiförmigen Hinterleibe der Pseudoskorpione der vordere Teil der Cauda mit enthalten. Statt der 4 Stigmenpaare

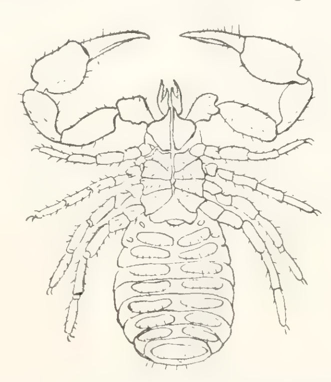


Fig. 14. Chelifer, Bauchseite. Nach Croneberg.

sind bei den Pseudoskorpionen nur 2 Paare vorhanden und diese befinden sich nicht auf der Fläche der Bauchplatten, sondern zwischen den Platten, wie wahrscheinlich auch bei den Silurskorpionen. Die Atmungsorgane selbst nehmen gewissermaßen eine Zwischenstufe zwischen den Röhrentracheen und den Fächertracheen ein. Sie bestehen aus einem starken Basalstamm, aus dessen Ende zahlreiche, sehr feine Röhren hervorgehen. Das Herz ist kurz, reicht vom Cephalothorax bis zum 4. Abdominalsegment, besitzt hinten nur wenige, jederseits 3, Spaltöffnungen und vorn eine einfache, sich vorn gabelnde Aorta. Die Sinnesorgane sind wie bei den Skorpionen entwickelt. Die Mittelaugen auf dem Kopfe fehlen aber stets und die Bothriotrichien, auf den Endgliedern der Palpenscheren, stehen nicht zwischen längeren Tasthaaren, sind also unter allen Spinnen-

tieren hier am meisten Tastreizen ausgesetzt. Immerhin sind sie gerade bei den Pseudoskorpionen durch die Form der Einlenkung sehr scharf von unzweifelhaften Tasthaaren, wie sie an den Cheliceren und an den Füßen vorkommen, verschieden. Das Zentralnervensystem ist auf ein oberes und ein unteres Schlundganglion reduziert. Die 4 Beinpaare sind trotz der geringen Größe und der Konzentration des Körpers alle erhalten geblieben. Das Sternum aber ist fast verschwunden und als Mundwerkzeuge beteiligen sich nur die Grundglieder der Palpen. Die Füße zeichnen sich von denen der Skorpione durch das Fehlen der Grab- und Stützstacheln und durch das Vorhandensein eines Haftorganes aus. Das letztere befähigt die Pseudoskorpione an glatten Wänden zu klettern. Ein wichtiger Unterschied ist in dem Bau der Cheliceren bemerkbar (Fig. 15). Einerseits besitzen die Tiere in den Cheliceren ein hochentwickeltes Reinigungsorgan für die Palpenscheren, indem am Innenrande des beweglichen Scherenfingers stets ein Kamm (k) mit einem meist etwas ausgehöhlten Grad (Serrula) vorhanden ist. Die Kämme der beiden Cheliceren umfassen beim Reinigen gemeinsam die Finger der Palpenscheren. Oft befindet sich an dem unbeweglichen Scherenfinger der Cheliceren noch ein 2. Kamm oder ein Hautsaum (Fig. 15h). Da Reinlichkeit besonders bei Kleintieren ein Lebensbedürfnis zu sein scheint, ist dieser Unterschied zwischen Pseudoskorpionen und Skorpionen sehr wohl verständlich. Als zweite Abweichung der Cheliceren von denen der Skorpione kommt hinzu, daß am Ende des beweglichen Scherenfingers, meist auf einem Fortsatz (Galea) (Fig. 15g), ein Spinnorgan ausmündet. Die Pseudoskorpione schließen sich nämlich zur Häutung, zur Eiablage, z. T. auch während der ungünstigen Jahreszeit in eine feine Gespinsthülle ein und bedürfen dazu der Spinnorgane. Die beiden aus mehreren Schläuchen bestehenden Spinndrüsen liegen vorn der Dorsalwand des Cephalothorax an. Die Nahrung der Pseudoskorpione besteht in sehr kleinem Getier, Springschwänzen, Bücherläusen usw. Einzelne Arten fand man öfter auf dem Körper größerer Tiere, z. B. unter den Flügeldecken der Käfer, am Bein einer Fliege, welches der Pseudoskorpion mit einer Palpenschere krampfhaft festhielt. Auch auf dem Kopfe von Kindern fand man sie. Im letzteren Falle waren stets auch Kopfläuse vorhanden und man nahm an, daß die Pseudoskorpione diesen nachstellten. Durch Fliegen, an deren Bein das Tier sich anklammert, wird es an einen neuen Ort getragen und mag darin ein wichtiges Verbreitungsmittel besitzen. Man sah andererseits, wie ein Pseudoskorpion eine Ameise am Bein festhielt, bis diese gestorben war, ohne sie zu fressen. Die Paarung ist noch nicht beobachtet worden. Die Eier werden als kleines Paket in der Nähe der weiblichen Geschlechtsorgane befestigt, ob mittels der oben genannten Spinndrüsen oder mittels einer Anhangdrüse der Geschlechtsorgane, die in zwei verschiedenen Formen bei demselben Tier vorkommt, dürfte noch nicht hinreichend festgestellt sein. Die Entwickelung des Eier setzt mit einer totalen Furchung ein und unterscheidet sich dadurch von der Entwickelung des Skorpions. Eine Aehnlichkeit zwischen beiden besteht darin, daß Embryonalhüllen zur Ausbildung gelangen. Die Entwickelung des Embryos weicht aber sehr erheblich von der Entwickelung anderer Spinnentiere ab. Zunächst kommt ein großes Saugorgan zur Ausbildung, bevor noch die Gliedmaßen sich entwickeln. Mittels dieses Organes saugt sich der Embryo an die Bauchhaut der Mutter an, um nun von dieser ernährt zu werden, wahrscheinlich aus einer der oben genannten Anhangdrüsen und zwar der umfangreicheren. Bei der ersten Häutung schwindet der Saugapparat und die Gliedmaßen treten auf.

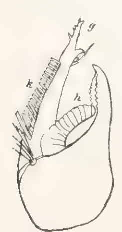


Fig. 15. Chelicere eines Chelifer. Nach Croneberg. g Galea; k Kamm; h Hautsaum.

Man unterscheidet folgende Familien:

I. Die Cheliceren sind so groß, daß die Entfernung ihrer hinteren Außenecken wenigstens $^2/_3$ so weit ist wie der Hinterrand des Cephalothorax; der Kamm des beweglichen Cheliceren-fingers ist wenigstens am Ende frei.

A. Der Tarsus des 1. Beinpaares ist eingliedrig. Chthoniidae.

B. Der Tarsus des 1. Beinpaares ist zweigliedrig. Obisiidae. Hierher gehört als häufigster Vertreter der gemeine Moosskorpion Obisium muscorum; ferner eine schlanke Höhlenform Blothrus spelaeus usw.

II. Die Cheliceren sind viel kleiner; die Serrula ist bis zum Ende angewachsen.

A. Alle Tarsen sind zweigliedrig; es sind 4 Augen vorhanden. Garypidae.

B. Alle Tarsen sind eingliedrig; es sind nur 2 oder gar keine Augen vorhanden. Cheliferidae. Hierher gehört der in Häusern häufige Bücherskorpion, Chelifer cancroides.

c) **Solifuga** (Solifugae), **Walzenspinnen.** Wie die Skorpione, so sind auch die Solifugen Spinnentiere, die zweifellos

manche ursprünglichen Charaktere bewahrt haben und die deshalb als Relikte gelten können. Bei den Solifugen sind es aber andere ursprüngliche Charaktere, die sich erhalten haben; deshalb machen die Solifugen einen völlig anderen Eindruck als die Skorpione. Nur einer der ursprünglichen Charaktere ist beiden Gruppen gemein, der langgestreckte, reichgegliederte Körper. Während aber beim Skorpion die gestreckte Körperform auch innerlich durch eine Bauchganglienkette zum Ausdruck gelangt, sind bei den Solifugen die die Beine innervierenden Ganglien eng miteinander verschmolzen, so daß nur ein einzelnes Abdominalganglion getrennt bleibt. Ein Charakter, dessen Fortentwickelung den Solifugen die Existenz bis in die Gegenwart gesichert hat, tritt uns in den mächtig entwickelten Cheliceren entgegen (Fig. 16). Die Muskulatur der Cheliceren ist so kräftig, daß die Solifugen die Panzer der hartschaligsten Käfer zerbeißen können. Sie können deshalb in Wüsten und Steppengegenden, wo hartschalige Käfer die Hauptvertreter der spärlichen Fauna sind, ihr Dasein fristen und sich hier trotz mancher ursprünglichen Charaktere, im Gegensatz zu anderen kleinen Räubern, erhalten. Die kräftigen Cheliceren gestatten es dem Tier außerdem, in einen fast steinharten, trockenen Lehmboden Höhlen zu graben oder eigentlich einzufressen und sich dadurch in der heißesten Jahreszeit der Sonnenglut zu entziehen.

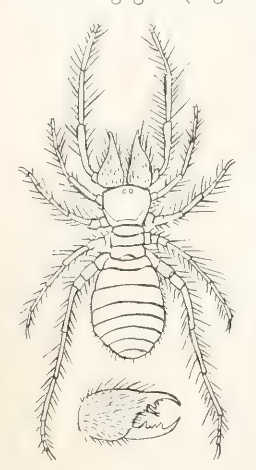


Fig. 16. Eine Solifuge. Nach Pocock. Unten die Chelicere.

Man meinte früher, daß der Biß der Solifugen giftig sei und wurde zu diesem Glauben vielleicht besonders durch die Tatsache verleitet, daß die Tiere, gereizt, einen zischenden oder fauchenden Ton hervorbringen, indem sie die geriefelten Innenseiten der beiden Cheliceren aneinanderreiben. Man hat aber trotz eifrigen Suchens Giftdrüsen nicht auffinden können und da außerdem zuverlässige Beobachter bei Bissen niemals die geringste Giftwirkung beobachten konnten, muß man annehmen, daß in wirklichen Vergiftungsfällen entweder eine Verwechslung mit einem Skorpionsstich oder eine nachträgliche Blutvergiftung vorlag. Die Solifugen sind nächtlich auf Beute ausgehende Tiere. Sie sind zwar nicht vollkommen und auch nicht immer in gleichem Maße lichtscheu. Namentlich zur Paarungszeit scheinen manche Arten das Tageslicht keineswegs zu meiden. Es darf uns also nicht wundernehmen, wenn von den Augen wenigstens die beiden Hauptaugen wohl entwickelt sind und wenn diese, wie man experimentell nachweisen konnte, beim Fange der Beute eine nicht unwichtige Rolle spielen. Die wichtigsten Sinneseindrücke aber werden den Solifugen, wie die rauh behaarte Oberfläche des Körpers erkennen läßt, durch die mächtig entwickelten Tasthaare vermittelt. Außer diesen Haaren dienen wahrscheinlich auch eigentümliche, am Ende erweiterte, nervenreiche Hautanhänge an den 3 Grundgliedern der Hinterbeine (Fig. 17 m) die sogenannten Malleoli oder Raquets als Tastorgane. Beim Auffinden des Weibchens spielen, wie die Beobachtung gelehrt hat, Geruchswahrnehmungen eine Hauptrolle und da nach Abschneiden der Palpen dem Männchen die Orientierung schwindet, an seinen Palpen aber eigenartige Nervenendigungen gefunden wurden, dürfen wir diese Nervenendigungen wohl für Geruchsorgane halten. Im Gegensatz zu den meisten anderen Spinnentieren sind die Solifugen sehr beweglich; damit steht die Tatsache in Einklang, daß als Atmungsorgane reichverzweigte Röhrentracheen vorhanden sind. Die Tracheen münden in 2 wohlentwickelten Stigmenpaaren und einem rudimentären Stigma zwischen den vorderen Bauchplatten des Hinterleibes und in einem ein wenig dorsal gerückten Paar zwischen den Hüften des 2. und 3. Beinpaares.

Das Herz ist sehr zartwandig, langgestreckt und mit 8 Ostienpaaren, 2 im Cephalothorax und 6 im Abdomen versehen. Im Einklang mit der großen Lebhaftigkeit der Solifugen steht es auch, daß sie im Gegensatz zu den Skorpionen äußerst gefräßig sind. Ein Galeodes caspius fraß nacheinander 4 bis 5 Geradflügler von der Größe einer Wanderheuschrecke. Eine so große Nahrungsmenge kann der Magen fassen, weil er mit ausgedehnten Blindsäcken versehen ist. Die Blindsäcke sind für einen Räuber, der zeitweise nicht viel Nahrung findet, von großer Bedeutung. Mit der Lebhaftigkeit der Solifugen hängt ferner die Ausbildung der Extremitäten zusammen: Nicht nur die langen Palpen, sondern auch die Vorderbeine sind wohlentwickelte Tastorgane. Freilich spielen die Palpen zugleich bei der Lokomotion eine nicht unwichtige Rolle. Eine an ihrem Ende befindliche Haftblase kommt nämlich beim Erklettern glatter Steine zur Anwendung. Sogar bei der Nahrungsaufnahme treten die Palpen in Tätigkeit, indem kleine Beutetiere mittels

der etwas klebrigen Haftblase gefangen und zum Munde geführt werden. Die Grundglieder der Palpen stoßen, wie die der Beine, auf der Mittellinie der Brust zusammen und lassen darin eine Aehnlichkeit mit den Pseudoskorpionen erkennen. Alle größeren Beutestücke werden von den Solifugen mit den Cheliceren zerbissen und ausgefressen.

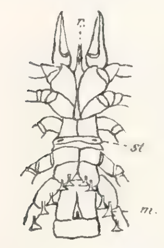


Fig. 17. Bauchseite einer Solifuge. Nach Blanchard. r Rostrum; st Stigma; m Malleoli.

Nach dem Mahl werden die Cheliceren durch Aneinanderreiben gereinigt. Beim Männchen besitzen sie einen z. T. eigenartig geformten Aufsatz, der bei der Paarung nicht unmittelbar in Tätigkeit tritt und deshalb wohl nur als Schmuck gedeutet werden kann. Zur Paarungszeit streifen die Solifugen mehr umher als sonst. Besonders häufig trifft man dann die reifen Männchen. Zur Nachtzeit kommen die Tiere oft in die Nähe der Lagerfeuer. Sie nähern sich dabei keineswegs unausgesetzt dem Lichte. Von einem Tropismus, wie bei den Pflanzen, kann also nicht die Rede sein. Auch bei Tage nähern sie sich gerne auffallenden Gegenständen, z. B. den Eisenbahnschienen. Den Drang, sich zur Paarungszeit dem Lichte und anderen auffallenden Gegenständen zu nähern und dabei sich zusammenzufinden, teilen die Solifugen mit vielen anderen Tieren. Wenn sich das Männchen dem Weibchen nähern will, sucht dieses seine Verteidigungsstellung einzunehmen, indem es den Vorderkörper mit den geöffneten Cheliceren und den Hinterleib ein wenig hebt. Das Männchen aber stürzt sich auf dasselbe, kneift mit seinen Cheliceren in die weiche Rückenhaut des Hinterleibes ein und wendet den Körper des Weibchens so, daß dieser nun eine Rückenlage einnimmt. Alsdann bohrt es die Spitzen seiner Cheliceren in die Vulva ein. Diese wölbt sich vor und öffnet sich. Dann hebt das Männchen den Hinterleib ein wenig, läßt einen Spermaballen aus der Geschlechtsöffnung austreten, faßt diesen mit einer Chelicere, stopft ihn in die Geschlechtsöffnung des Weibchens hinein und kneift nun deren Ränder zusammen. Damit ist der Vorgang beendet. Jetzt muß das Männchen sich schleunigst davon machen, wenn es nicht von dem stärkeren Weibchen ergriffen und verzehrt werden will. Bei einer zweiten Paarung, die dasselbe Männchen ausführt, ist der Spermaballen schon bedeutend kleiner und das Männchen zeigt sich weniger behend. Die Wahrscheinlichkeit, daß es vom Weibchen verzehrt wird, wächst also mit der Zahl der ausgeführten Kopulationen. Schließlich geht es auch ohnedies bald zugrunde. In den weiblichen Geschlechtsorganen wandern die Spermatophoren des Ballens allmählich nach dem Eierstock hin, um hier die Eier zu befruchten. Während die Eier sich entwickeln und dabei an Umfang zunehmen, verliert das Weibchen den Appetit, gräbt sich etwa 20 cm tief ein und kommt jetzt, zur heißesten Jahreszeit, nicht mehr hervor. Nach einigen Wochen werden 50 bis 100 Eier abgelegt und aus diesen kommen, bisweilen schon nach 1 bis 2 Tagen, die kleinen, zunächst noch unbeweglichen Jungen hervor. Erst nach der ersten Häutung, die in 2 bis 3 Wochen erfolgt, zerstreuen sich die Jungen. Das Weibchen läßt sich nach der Eiablage noch einige Zeit am Leben erhalten, dürfte aber immer schon in demselben Jahre zugrunde gehen. In ihrer Entwickelung unterscheiden sich die Solifugen von den Skorpionen besonders dadurch, daß keine Embryonalhüllen vorkommen. Eigenartig ist das Auftreten von 2 flügelartigen „Lateralorganen" zwischen dem 1. und 2. Beinpaar. Da man derartige Organe in gleicher Form und Lage sonst nur bei den Pedipalpen, bei Limulus und bei Krebsen kennt, hat man aus ihnen auf eine nähere Verwandtschaft dieser Formen geschlossen. Später verschwinden diese Organe. Physiologisch werden sie für embryonale Blutkiemen gehalten.

Man unterscheidet folgende Familien:

I. Das kurze 4. Beinpaar ist krallenlos. Hexisopodidae. In Südafrika.

II. Das stark verlängerte 4. Beinpaar ist mit großen Krallen versehen.

A. Die Abdominalstigmen sind von einer am Hinterrande gezähnelten Platte bedeckt. Die Krallen sind behaart. Galeodidae. Mediterran.

B. Die Abdominalstigmen sind nicht von gezähnelter Platte geschützt; die Krallen sind kahl. Solpugidae. Die Gattungen sind teils afrikanisch (Solpuga usw.), teils altweltlich (Daesia, Rhagodes, [Rhax] Karschia), teils nordamerikanisch (Eremobates usw.), teils auch in Südamerika verbreitet (Ammotrecha [Cleobis] usw.).

d) **Pedipalpa** (Pedipalpi) **Pedipalpen.** Die Pedipalpen sind in morphologischer Beziehung äußerst interessant; im Haushalte der Natur aber haben sie eine sehr geringe Bedeutung. Morphologisch sind sie gewissermaßen ein Bindeglied oder richtiger eine verbindende Kette zwischen den übrigen Spinnentiergruppen. Biologisch aber bilden sie keine größere einheitliche Gruppe, füllen vielmehr hier und da nur eine Lücke in dem Getriebe der ganzen Tierwelt aus. Es

mag deshalb in diesem Falle eine Uebersicht der Unterordnungen oder Familien vorausgeschickt werden.

I. Die Cheliceren sind dreigliedrig, scherenförmig; die Palpen und die Beine des ersten Paares sind je mit 2 Endkrallen versehen; die Hüfte der Palpen tritt nicht als Maxille an den Mund heran; Hörhaare befinden sich nur am ersten Beinpaar und zwar in größerer Zahl. Palpigradi (Microthelyphonida) Familie Koeneniidae. Einzelne Arten kennt man aus Paraguay, Chile, Texas, dem Mittelmeergebiet und Ost-Asien.

II. Die Cheliceren sind zweigliedrig und selten richtig scherenförmig; die Palpen und die Beine des ersten Paares enden nicht mit zwei Krallen; die Coxa des ersten Beinpaares tritt als Maxille an den Mund heran; Hörhaare befinden sich stets an dem Metatarsus der drei hinteren Beinpaare, an dem Bein des 1. Paares höchstens 2.

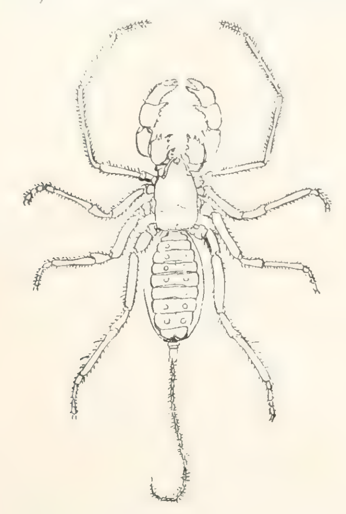


Fig. 18. Ein Thelyphonus. Nach Pocock.

A. Der Körper ist langgestreckt und endet hinten in einen dünnen Anhang (Flagellum) (Fig. 18); der Cephalothorax ist länger als breit; das 1. Beinpaar ist wenig verlängert, der Tarsus weniggliedrig; Hörhaare befinden sich je eins am Ende des Metatarsus der drei hinteren Beinpaare, am vorderen Metatarsus deren zwei (Uropygi).

a) Der Rückenschild des Cephalothorax zerfällt in 2 bis 3 Teile, einen größeren Vorderteil und 1 bis 2 schmale Hinterschilder; die Cheliceren bilden eine deutliche Schere; das Flagellum ist 1- bis 3gliedrig, Tartarides (Tartaridi, Schizopeltidia), Fam. Schizonotidae. Nur wenige Arten sind bekannt, aus dem neotropischen, dem äthiopischen und dem orientalischen Gebiet bis Neu-Guinea.

b) Der Rückenschild des Cephalothorax ist ungeteilt; die Cheliceren bilden keine richtige Schere; das Flagellum ist vielgliedrig. Oxypoei (Holopeltidia), Familie Thelyphonidae. Hierher gehören zahlreiche Vertreter des orientalischen Gebietes (Thelyphonus usw.) bis Neu-Guinea und Samoa (Abalius) nebst einigen Vertretern in Amerika (Mastigoproctus usw.).

B. Der Körper ist breit und flachgedrückt und hinten nicht in ein Flagellum verlängert (Fig. 19). Der ungeteilte Cephalothorax ist wenigstens so breit wie lang; die Beine des 1. Paares sind in eine sehr lange Geißel verlängert; Hörhaare befinden sich nur auf den drei hinteren Beinpaaren und zwar am Ende und an der Wurzel des Metatarsus, in größerer Zahl. Amblypygi, Familie Tarantulidae. Hierher gehören eine indisch-afrikanische (Phrynichinae), eine indisch-pacifische (Charontinae) und eine amerikanische Unterfamilie (Tarantulinae früher Phrynus).

Was die Lebensweise der Pedipalpen anbetrifft, so haben alle genannten Gruppen nur das eine gemein, daß die Tiere äußerst versteckt vorkommen. Die Vertreter der beiden ersten Gruppen gehören außerdem zu den Kleintieren und besitzen deshalb alle bei den Pseudoskorpionen schon genannten Vorteile. Die beiden letztgenannten Gruppen schließen sich mehr den Skorpionen an, indem sie äußerst träge in ihren Bewegungen sind und langsam wachsen, so daß sie einer sehr geringen Nahrungsmenge bedürfen. Vor Feinden gewähren den Thelyphoniden die beiden als Analorgane gedeuteten Stinkdrüsen, den Tarantuliden die äußerst langen Tastorgane geeigneten Schutz. Die Koenenien leben an feuchten Orten unter Steinen, besonders in subtropischen Gebieten, die Schizonotiden dagegen unter abgefallenem Laub in feuchten Tropenwäldern. Die Thelyphoniden graben sich in wärmeren Gebieten in den feuchten Waldboden ein. Die flachgedrückten Taran-

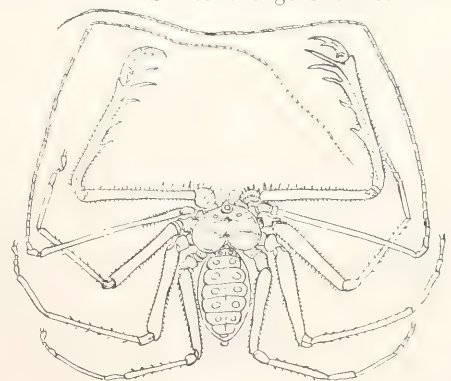


Fig. 19. Eine Tarantulide. Nach Pocock.

tuliden endlich halten sich unter lockerer Rinde und zwischen den Brettstützen der Tropenbäume auf. Nach diesen kurzen Angaben über die Lebensweise wird der Bau, soweit es sich nicht um ursprüngliche Charaktere handelt, leicht verständlich sein. Bei den Vertretern der beiden Kleintiergruppen ist, da sie eine größere Beweglich-

keit besitzen, der Rückenschild des Cephalothorax (Peltidium) in ein großes Propeltidium und ein kleines Metapeltidium gegliedert. Die Cheliceren sind wie bei den ebenfalls kleinen Pseudoskorpionen in weitem Maße Reinigungsorgane und deshalb an den Scherenfingern mit Kammzähnen versehen. Mit den Pseudoskorpionen haben die Koenenien auch das gemein, daß die Bothriotrichien offenbar zugleich Organe des feinen Tastsinnes am vorderen Körperende sind. Die Augen fehlen den beiden Kleintiergruppen gänzlich. Bei den beiden anderen sind sowohl Mittel- als Seitenaugen, in freilich nicht sehr vollkommener Ausbildung, vorhanden. Das bei den Thelyphoniden noch weit getrennte Abdominalganglion rückt bei den beiden Kleintiergruppen nahe an das untere Schlundganglion heran, um bei den Tarantuliden ganz mit diesem zu verschmelzen. Die gleichen Abstufungen zeigt das Herz. Während es im Abdomen der Thelyphoniden noch 7 Ostienpaare zeigt, sinkt diese Zahl bei den Tarantuliden auf 6, bei den Schizonotiden der geringeren Größe wegen auf 5 und bei den Koenenien sogar auf 4. Außer diesen Anpassungscharakteren sind auch einige scheinbar ursprüngliche Charaktere zu nennen: Das segmentierte Sternum ist allen Pedipalpen gemein. Bei den Koenenien fehlen die Malpighischen Gefäße und sind durch die stark entwickelten, bis in das Abdomen verlängerten Coxaldrüsen ersetzt. Die Palpen und Vorderbeine besitzen bei den Koenenien Beinform. Sie sind mit je 2 Krallen versehen und das Basalglied der Palpen ist nicht als Maxille (Gnathocoxit) entwickelt.

Als Atmungsorgane sind bei den Thelyphoniden und Tarantuliden 2 Paare von Fächertracheen vorhanden. Die Schizonotiden dagegen besitzen nur ein Paar und die Koenenien garkeins. Dafür treten bei einigen Koenenien eigentümliche, vorstülpbare Ventralsäckchen auf, die wahrscheinlich zur Vergrößerung der hier als Atmungsorgan fungierenden Körperoberfläche dienen. Ein Paar derartiger Ventralsäcke wurde auch bei den Tarantuliden nachgewiesen und zwar an dem Segment des 2. Stigmenpaares. Sollten wir in diesen Säckchen Atmungsorgane vor uns haben, die den ursprünglichen ähnlich sind, so müssen wir annehmen, daß sich an dem genannten Segment der Tarantuliden das ursprüngliche Atmungsorgan geteilt und in verschiedener Richtung weiterentwickelt hat.

Die Cheliceren nehmen bei den Pedipalpen stufenweise die Form an, die wir bei den echten Spinnen als Mandibeln kennen lernen werden. Die Palpen zeigen uns eine umgekehrte Umwandlung von einem den Skorpionscheren ähnlich wirkenden, bei den Tarantuliden sehr weit vorstreckbaren Greiforgan bis zu der oben schon genannten Fußform bei Koenenia. Im Gegensatz zum Taster der Spinnen fehlt den Palpen der Koenenien die Patella. Sekundäre Geschlechtscharaktere treten bei den Pedipalpen namentlich an den Palpen und am ersten Beinpaar auf. Die abgelegten Eier werden, offenbar durch ein Sekret der Anhangdrüsen, in einen Kokon eingeschlossen und am Bauche getragen.

e) **Araneida** (Araneae). **Echte Spinnen.** In den echten Spinnen haben wir zum erstenmal einen wirklich lebenskräftigen Zweig des Spinnentierstammbaumes vor uns. Der außerordentliche Formenreichtum läßt das zur Genüge erkennen und ebenso der Bau. Die Reliktencharaktere treten ganz zurück. Was man an dem Körper der Spinnen sieht, steht mit Aeußerungen ihrer Lebensweise in engster Beziehung (Fig. 24). Biologisch wird die Spinne besonders durch ihr Fadenspinnen charakterisiert. In der einfachsten und wahrscheinlich auch ursprünglichsten Form dient diese Spinntätigkeit zur Herstellung eines Kokons für die Eier. An die Herstellung des Kokons schließt sich der Bau einer Wohnung an. Als höchste Stufe der Spinn- und Webetätigkeit aber ist die Herstellung eines Fanggewebes zu betrachten. Auch das Nachziehen eines Fadens beim Gehen ist übrigens von nicht geringer Bedeutung für die Erhaltung der Art. Spinnen, die nicht unmittelbar am Boden leben, können sich ihren Feinden entziehen, indem sie sich fallen lassen und mit angezogenen Beinen ruhig am Boden liegen bleiben, „sich tot stellen". Nachdem die Gefahr vorüber ist, können sie jederzeit an dem hinterlassenen Faden in ihr Jagdgebiet zurückkehren. Endlich ist das sogenannte Fadenschießen, d. h. das Hervortretenlassen eines freien, vom Windhauch fortgeführten Fadens ein unschätzbares Verbreitungsmittel. Spinnen, die auf Pflanzen leben, gelangen mittels dieser Fäden von Halm zu Halm, von Blatt zu Blatt, von Baum zu Baum, ohne jedesmal an den Boden hinuntersteigen zu müssen. Ja, die junge Spinne wandert, solange sie noch leicht ist, mittels dieser Fäden hunderte von Kilometern weit, indem sie sich durch den vom sonnenbeschienenen Boden aufsteigenden warmen Luftstrom, namentlich im Herbst und Frühling, mittels eines flatternden Fadens aufheben und fortführen läßt („fliegender Sommer", „Altweibersommer", „Marienfäden"). Bei dieser außerordentlich hohen Bedeutung der Spinntätigkeit für die Erhaltung der Art darf man sich nicht wundern, daß sie den ganzen Bau der Spinne beherrscht. Das wichtigste morphologische Substrat der Spinntätigkeit sind die Spinnorgane selbst. Sie bestehen aus den Spinndrüsen (Fig. 20), die einen

bedeutenden Raum im Hinterleibe einnehmen und je nach ihrer speziellen Funktion verschieden umfangreich und verschieden geformt sind und aus den auf 2 bis 8, meist am Ende des Hinterleibes stehenden Spinnwarzen mit zahlreichen feineren und dickeren

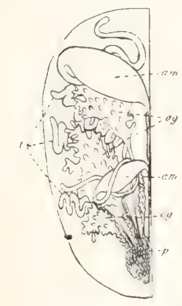


Fig. 20. Spinndrüsen einer Radnetzspinne. Nach Apstein. Eine Hälfte. ag Glandulae aggregatae; am Gl. ampullaceae; p Gl. piriformes und aciniformes; t Gl. tubuliformes.

Spinnröhren oder Spinnspulen (Fig. 21). Jede Spinnspule liefert einen Faden. Diese Fäden trocknen wegen ihrer Feinheit — die feinsten fand man 0,0004 mm dick — sehr schnell und treten, ohne Zutun der Spinne zu einem, wegen ihrer Zusammensetzung aus vielen Fäden, sehr gleichmäßigen und deshalb sehr haltbaren Faden von etwa 0,005 mm Dicke zusammen. Von anderen Organen haben sich zunächst die Füße der Webetätigkeit angepaßt. Ein Tier, das Fäden herstellt und benutzen soll, muß diese auch handhaben, muß auf ihnen laufen, an ihnen klettern können. Die Spinne kann tatsächlich einen Faden festhalten. Die Krallen sind nämlich mit dichtstehenden Kamm-

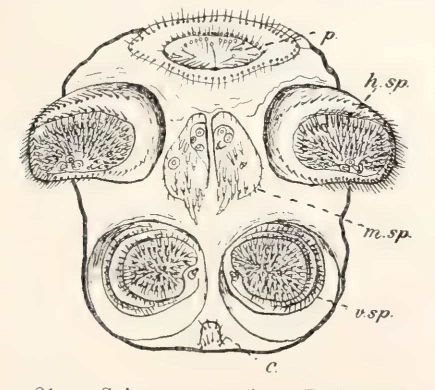


Fig. 21. Spinnwarzen einer Radnetzspinne. Nach Emerton. p Pygidium; c Colulus; h, m, v, sp hintere, mittlere und vordere Spinnwarzen.

zähnen versehen und der Faden klemmt sich zwischen diese ein. Oft kommen noch eigenartige Haare hinzu, die an der Unterseite tief gesägt sind (Fig. 27g). Auch sie tragen dazu bei, daß die Spinne auf den Fäden laufen kann. Für die verschiedenen Arten des Webens sind, wie wir noch sehen werden, besondere Einrichtungen vorhanden. Für einen so vollkommenen Spinnapparat, wie die Spinnen ihn besitzen, stand nur im Hinterleibe ein hinreichender Platz zur Verfügung. Sollte aber der Hinterleib zum Spinnen geeignet sein, so mußte er hinreichend bewegt werden können und dabei doch einer sicheren Führung nicht entbehren. Beides wurde erreicht einerseits durch die stielartige Abschnürung des Hinterkörpers und andererseits durch das Fehlen einer weiteren Gliederung. Bei der einzigen Spinnengattung mit gegliedertem Hinterleib (Liphistius) sind die Spinnwarzen tatsächlich am Bauche weit nach vorne gerückt. In allen anderen Fällen befinden sie sich am freien Ende des ungegliederten Hinterleibes oder doch in dessen Nähe, also an einer sehr günstigen Stelle. Da das Hinterleibsende einerseits von den Spinnwarzen und andererseits von dem auf dem Pygidium ausmündenden After vollkommen eingenommen wird, ist an dieser Stelle, wie schon oben hervorgehoben wurde, für die Kopulationsorgane kein Platz mehr.



Fig. 22. Taster einer Spinne. s Samenschlauch; a Ausführungsgang desselben; e Embolus; k Klammerhaken.

Für sie, namentlich auch für die weibliche Geschlechtsöffnung, die bei Landtieren am Hinterende des Körpers entschieden den günstigsten Ort findet, bleibt also bei den Spinnen nur die Bauchseite des Abdomens. Durch diese Lage wird gerade bei Tieren, die der Greiforgane entbehren, die Kopulation sehr erschwert. Es treten deshalb Klammerorgane an den Palpen oder Tastern der Männchen auf und mit den Klammerorganen zugleich ein Uebertragungsorgan des Spermas: Das verdickte Endglied der männlichen Taster enthält einen Schlauch mit langem röhrenförmigen Ausführungsgang und besitzt oft auch Klammerhaken (Fig. 22). Vor der Annäherung an das Weibchen spinnt das Männchen ein kleines deckenförmiges Gewebe, läßt einen Spermatropfen aus der Geschlechtsöffnung auf dasselbe treten, saugt diesen mit den beiden Tasterschläuchen auf und führt nun die röhrenförmige Spitze, den sogenannten Embo-

lus der beiden Taster abwechselnd in die weibliche Geschlechtsöffnung ein. Zugleich greifen Klammerhaken in entsprechende Vertiefungen der Vulva (Epigyne) ein. Zur Anfeuchtung des Spermas dient das Sekret einer beim Männchen aus zahlreichen Schläuchen bestehenden Drüse an der Vorderseite der Maxille (Fig. 23). Da das Männchen oft schwächer ist als das Weibchen, wird



Fig. 23. Querschnitt durch die Maxillardrüse einer männlichen Spinne.

es nach der Befruchtung oft von diesem verzehrt. Bisweilen ist das Männchen freilich so klein und dünn (Nephila usw. Fig. 24), daß es vom Weibchen als Nahrung verschmäht wird (Zwergmännchen). Oft ist auch das Männchen größer und kräftiger als das Weibchen (Argyroneta, Pachygnatha usw.), so daß auch dann eine Gefahr, aufgefressen zu werden, für dasselbe nicht besteht. Vielfach sind beim Männchen auch sekundäre Geschlechtscharaktere vorhanden, entweder Form- oder Farbencharaktere. Die Männchen von Tetragnatha, Salticus usw. zeichnen sich durch mächtig entwickelte Mandibeln aus, die Männchen vieler Linyphiiden und Micryphantiden durch Kopfaufsätze, die entweder die Augen tragen oder zwischen denselben stehen. Vielfach zeichnet sich auch das Männchen durch schöne Farben aus (Eresus, Philaeus usw.). Seltener zeichnen Stridulationsorgane das Männchen (Asagena usw.), die dann mit Sicherheit darauf schließen lassen, daß

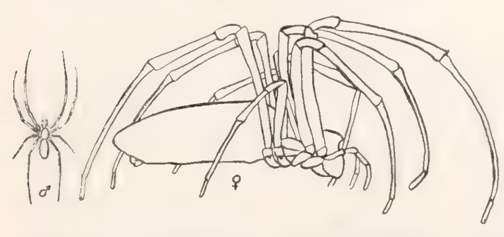


Fig. 24. Männchen und Weibchen der Seidenspinne, Nephila. Nach Simon und Pocock. ¾ der natürlichen Größe.

die Weibchen hören können. Wie durch einen Spinnapparat, so zeichnen sich alle echten Spinnen auch durch Giftdrüsen aus. Die Giftdrüsen liegen im Vorderteil des Cephalothorax, sind je von einem Spiralmuskel eingeschlossen und münden vor der Spitze der Mandibelklaue (Fig. 25). Die Giftwaffe dient zur Bewältigung der Beute, da diese verhältnismäßig groß zu sein pflegt, oft auch mit einer Waffe versehen ist (Bienen). In manchen Fällen dient die Waffe aber sicher auch zum Schutz gegen Feinde; denn manche Spinnen sind mit lebhaften Farben versehen, mit Farben, die ganz den Eindruck von Schreck- oder Warnfarben machen, zumal wenn die Spinne diese Farben zeigt, sobald sie angegriffen wird (Poecilotheria). Die großen Spinnenarten bringen oft auch mittels eines Stridulationsapparates einen zischenden Ton hervor. — Die Arten einer fast über die ganze Erde verbreiteten Gattung (Latrodectus) sollen Menschen gefährlich werden.

Als Greiforgane besitzen die Spinnen nur ihre Cheliceren oder Mandibeln. Die Palpen würden, als umfangreiche Greiforgane ausgebildet, vielleicht beim Weben hinderlich sein. Für das fehlende Greiforgan der Pedipalpen tritt hier die Giftwaffe als Ersatz ein. Freilich kann das Greifen trotz der Giftwirkung des Bisses nicht ganz entbehrt werden. Deshalb sehen wir innerhalb der Ordnung der Spinnen eine eigenartige Umwandlung eintreten. Die senkrecht sich öffnenden einzeln als Zange wirkenden Cheliceren wandeln sich jede in einen Zangenarm um, und bewegen sich nun als eine einzige Zange seitlich gegeneinander (Fig. 25). Durch diese Umwandlung geht freilich die halbe Kraft verloren, da für jeden Arm der Zange Muskeln nötig sind, aber ebensoviel wird an Exkursionsfähigkeit gewonnen; d. h. die Zange kann sich weiter öffnen. In gleicher Weise stehen bekanntlich die Wirbeltiere und die Insekten einander gegenüber. Bei den Wirbeltieren mit innerem Skelett und größerer Exkursionsfähigkeit wird durch Vertikalbewegung der Kiefer und durch Unbeweglichkeit des Oberkiefers als des oberen Zangenarmes Kraft gewonnen. Bei den Insekten wird Exkursionsfähigkeit unter Verlust der halben Kraft gewonnen. Die Spinnen geben uns physiologisch die Lösung des Problems. Da bei ihnen Kraft durch Giftwirkung ersetzt ist, kann Exkursionsfähigkeit gewonnen werden. Ist das Beutetier getötet, so wird es, wie es scheint, mit demselben (Gift-) Drüsensekret eingespeichelt und nun tritt der bei den Spinnen so hoch entwickelte, hinter den Schlundganglien liegende Saugapparat (Fig. 10 s. m.) in Tätigkeit. Die Nährstoffe werden, nachdem die sogenannte Leber gefüllt ist, in umfangreiche, oft bis in die Hüften der

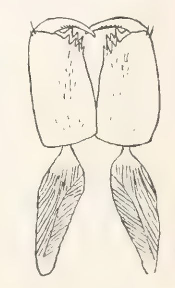


Fig. 25. Mandibeln einer Spinne mit Giftdrüsen.

Beine verlängerte Vorratsschläuche gepumpt. Welche Aufgabe die unter Poren am Vorderrande der Maxillen liegenden hohen Zellen, die als Geruchsorgan gedeutet wurden, besitzen, ist noch nicht aufgeklärt. Als Atmungsorgane sind bei den trägeren, meist großen Arten (Tetrapneumones) zwei Paare von Fächertracheen vorhanden, bei allen anderen treten an die Stelle des hinteren Paares Röhrentracheen (Dipneumones), selten auch an die Stelle des vorderen Paares (Caponia). Die Oeffnungen der Röhrentracheen bleiben selten vorn am Hinterleibe (Dysdera, Segestria). Meist rücken sie nach hinten, entweder bis auf die Mitte des Bauches (Argyronetidae. Anyphaeninae) oder gewöhnlich bis vor die Spinnwarzen. Das Herz der Spinnen liegt im Abdomen, besitzt nur wenige Ostien und entsendet eine in zwei Aeste sich teilende Aorta bis zum Gehirn. Zur Reinigung der Füße dienen lange dicke Haare an den Mandibeln,. Vielleicht hat ein behaarter drüsiger Spalt auf der Oberlippe (Fig. 10ol) dieselbe Funktion.

Bei der Entwickelung der Spinnen interessieren uns besonders die Spinnwarzen, da sie hier zum erstenmal auftreten. Ihre Entwickelung setzt in derselben Weise ein, wie die Entwickelung der Extremitäten am vorderen Körperende. Zwei Paare von Extremitätenanlagen liefern die 6 Spinnwarzen. Von den hinteren schnürt sich nämlich innen ein Teil ab, um das mittlere Spinnwarzenpaar zu liefern und wenn eine Spinnplatte vor den Spinnwarzen, ein Cribrellum (Cribellum) vorhanden ist, so wird diese vom vorderen Paar geliefert. Von einem Exo- und Entopoditen kann nach neueren Untersuchungen nicht die Rede sein. Das bei den meisten Spinnen unter den Spinnwarzen befindliche kleine Zäpfchen, der Colulus (Fig. 21c), ist als letzter Rest der Spinnplatte und damit auch als letzter Rest des vorderen inneren Spinnwarzenpaares, welches sich nur noch bei Liphistius erhalten hat, zu betrachten. Die meisten Spinnen leben nur ein Jahr (Aranea, Theridium, Linyphia, Agelena, Lycosa). Einige werden erst in 2 Jahren reif (Dolomedes, Anyphaena usw.), noch andere erst in etwa 4 Jahren (Tetrapneumones). Diese letzteren bleiben nach der Reife bisweilen noch 3 bis 4 Jahre am Leben und können vielleicht mehrere Jahre nacheinander Eier ablegen.

Bei dem außerordentlichen Formenreichtum in dieser Ordnung kann eine Ueberssicht aller Familien nicht gegeben werden. Die Unterordnungen sind folgende:

I. Das Abdomen ist dorsal segmentiert; es sind 8 Spinnwarzen vorhanden, die weit vor dem After stehen. Verticulatae (Mesothelae). Hierher nur die hinterindische Gattung Liphistius (Lipistius).

II. Das Abdomen ist nicht segmentiert; es sind höchstens 6 Spinnwarzen und bisweilen ein Cribellum vorhanden. Die Spinnorgane stehen meist in der Nähe des am Hinterleibsende befindlichen Afters (Opisthothelae).

A. Es sind 4 Fächertracheen vorhanden und die Mandibelklaue bewegt sich meist von oben nach unten, Vogelspinnen, Tetrapneumones.

B. Es sind 2 oder keine Fächertracheen vorhanden; die Mandibelklaue schlägt stets nach innen ein.

a) Es sind 2 Fächertracheen vorhanden.

α) Das Tarsenendglied trägt kein Hörhaar. Viele sind Netzspinnen, Sedentariae.

* Das vorletzte Tarsenglied ist am Ende mit 2 Hörhaaren versehen, von denen eins nach oben, eins nach vorn gerichtet ist. Chalinurae, Familie Hersiliidae. Die wenigen Arten dieser durch lange Spinnwarzen ausgezeichneten Gruppe sind über die Tropen der ganzen Erde verbreitet, aber auch aus dem Bernstein bekannt.

** Das vorletzte Tarsenglied ist mit einem oder mit einer Reihe von Hörhaaren versehen; meist Netzspinnen, Oligotrichiae.

β) Das Tarsenendglied ist wenigstens mit einem Hörhaar versehen. Vielfach nicht an ein Netz gebundene Spinnen, Vagabundae.

αα) Das Tarsenendglied ist mit einer einfachen Reihe von regelmäßig abgestuften Hörhaaren (Fig. 5hh) oder mit einem einzigen Hörhaar versehen, höchstens steht ein kleines Haar außerhalb der Reihe.

* Die Füße sind mit einer kleinen dritten Kralle versehen. Trichterspinnen, Stichotrichiae.

** Die Füße sind mit nur 2 Krallen versehen.

† Die vorderen Mittelaugen sind sehr groß und genau nach vorn gerichtet. Springspinnen, Saltigradae.

†† Die vorderen Mittelaugen sind nicht sehr groß und nicht nach vorn gerichtet. Krabbenspinnen, Laterigradae.

ββ) Das Tarsenendglied ist entweder mit 2 Reihen von Hörhaaren oder mit zahlreichen, nicht regelmäßig abgestuften Hörhaaren versehen.

* Die hintere Augenreihe ist an den Seiten so stark nach hinten gebogen, daß eine an den Vorderrand der beiden Seitenaugen angelegte Tangente, die Mittelaugen nicht schneidet. (Fig. 26 l u. m) Laufspinnen, Citigradae.

** Die hintere Augenreihe ist an den Seiten nicht stark nach hinten gebogen.

† Der Fuß ist mit einer kleinen dritten Kralle versehen. Polytrichiae s. str.

†† Der Fuß ist mit nur 2 Krallen und meist mit Hafthaaren (Skopula) versehen. Röhrenspinnen, Tubitelae.

b) Es sind nur Röhrentracheen vorhanden. Apneumones (Caponia usw.). Wenige in Südafrika und im neotropischen Gebiete vorkommende Arten.

Zu den Tetrapneumones gehören vor allem die großen Vogelspinnen, die man früher unter dem Namen Mygale zusammenfaßte, jetzt aber Aviculariidae oder

Theraphosiidae nennt. Sie besitzen eine dichtbehaarte Fußsohle und können mittels dieser Hafteinrichtung an glatten Baumstämmen laufen. Bei Tage halten sie sich in Baumhöhlen oder zwischen Astgabeln versteckt, um nachts auf Beute auszugehen. Die Beute besteht, wie die Beobachtung lehrt, besonders in Insekten. Doch sind die Tiere auch imstande, kleine Wirbeltiere zu bewältigen. Daß sie gelegentlich ein Vogelnest plündern, ist von zuverlässiger Seite bestätigt. Immerhin dürfte das eine seltene Ausnahme von der Regel sein. Sie besitzen nur eine Art von Spinndrüsen (Glandulae piriformes) und 4, bisweilen recht lange, Spinnwarzen. Dem einfachen Spinnapparat entsprechend stellen sie höchstens eine sehr unvollkommene Decke als Fangnetz her. Als weitere Gruppe gehören hierher die Tapezier- oder Falltürspinnen (Ctenizа, Nemesia usw.), die eine selbstgegrabene oder vorgefundene

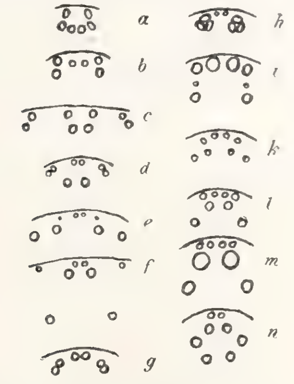


Fig. 26. Augenstellung a Dysdera; b Segestria; c Aranea; d Linyphia; e Hyptiotes; f Eresus; g Scytodes; h Pholcus; i Sitticus; k Philodromus; l Pisaura; m Lycosa; n Oxyopes.

Röhre im Boden oder in einem Baumstamme mit dichten Fäden auskleiden und die Oeffnung mit einem äußerst künstlich hergestellten Deckel schließen. Innen ist der Deckel wie die Röhre mit Fäden dicht bekleidet, äußerlich mit Steinchen oder Flechten dicht beklebt, so daß es sehr schwer ist ihn zu erkennen. An einer Stelle des Randes besitzt der Deckel ein Charnier. Die Arten einer Gruppe (Cyclocosmia usw.) schließen die Röhre wahrscheinlich, statt mit einem Deckel, mit dem scheibenförmigen Hinterleib. Eine Gattung, mit 6 Spinnwarzen versehen, Atypus, gibt es auch bei uns. Sie stellt eine lange Gespinströhre her, die größtenteils im Boden steckt, aber in einen freien, dem Boden aufliegenden Endteil sich fortsetzt. Der Endteil dient zum Fange von Insekten, welche über denselben hinweglaufen wollen. Die Hypochilidae, mit nach innen einschlagbaren Mandibelklauen, bilden den Uebergang zu den Dipneumones.

An sie schließen sich unter den Oligotrichiae die Dysderidae (Dysdera Segestria usw. Fig. 26 a und b), mit zwei hintereinander liegenden Stigmenpaaren und meist 6 Augen an; ferner die Filistatidae, Oecobiidae und Urocteidae mit ebenfalls dicht zusammengedrängten Augen. Als wichtigste Familie der Oligotrichiae können wir die Radnetzspinnen Araneidae (Orbitelariae. Epeiridae Fig. 26c) betrachten. Sie unterscheiden sich von allen anderen Spinnen durch den Besitz eines stumpfen Stachels am Hinterfuß, den Webestachel (Fig. 27w).

Fig. 27. Hinterfuß einer Radnetzspinne. ak Afterkralle; g Gehborsten; k Kralle; t Tasthaar; w Webestachel.

Die Radnetzspinnen sind Tiere mit hochentwickelten Kunsttrieben (Instinkten). Das Radnetz, das übrigens der Art nach erheblich variiert, wird etwa in folgender Weise hergestellt; Zunächst läßt die Spinne einen freien Faden vom Winde fortführen. Haftet dieser irgendwo, so läuft die Spinne über ihn hin und verstärkt ihn. Dann läßt sie sich von dessen Mitte herab zu irgendeinem Halm am Boden. In diesem Vertikalfaden sind die beiden ersten Speichen des künftigen Radnetzes geschaffen. Dann folgt die Vervollständigung des Rahmens, dessen oberer Teil der erste Horizontalfaden ist. Im Gezweig eines Strauches werden zuerst einige Fäden scheinbar ziemlich regellos gezogen. Bald aber kommt ein Rahmen zustande und gleichzeitig mit diesem meist der erste Durchmesser (Fig. 28). Von einem Mittelpunkt des ersten Durchmessers aus werden alsdann zahlreiche Speichen bis an den Rahmen gezogen, bald nach dieser, bald nach jener Seite, damit das Ganze immer straff gespannt bleibt. Wird einmal eine Speiche schlaff, so wird sie durch einen Seitenfaden wieder gespannt. Der neue Faden wird jedesmal mit dem Hinterfuß gehalten, damit er nicht zu früh anklebt. Er gleitet durch eine Oeffnung hindurch, die einerseits durch die dritte Kralle, andererseits durch Borsten gebildet wird (Fig. 27 ak u. g). Mit den Speichen zugleich entsteht eine Decke um den Mittelpunkt (Fig. 28d). Dann wird eine Spirale bis zum äußeren Rande gezogen und endlich von außen nach innen die eigentliche Fangspirale. Der Fangfaden wird durch Drücken mit dem Hinterfuß aus den Spinndrüsen gleichsam hervorgezogen. Dabei wird, wie es scheint, der glatte Webestachel am Hinterfuß (Hamulus, Fig. 27 w) verwendet. Die Fangspirale wird im äußersten Winkel des Rahmens (Fig. 28 l) begonnen. Dann werden zuerst Querfäden gezogen, bis dieser äußerste Winkel ausgefüllt ist. Darauf wird der nächste Winkel ausgefüllt usw., bis die Spirale rings um den Mittelpunkt verläuft. Zwischen der Fangspirale und der mittleren Decke bleibt ein kleiner Raum frei. Beim Spinnen und Weben der Radnetzspinnen treten verschiedene Drüsen in Tätigkeit: Läßt sich z. B. die Spinne an einem Faden herab, um später wieder hochzusteigen, so drückt sie zunächst die etwa 200 kleinen Spinnröhren

der vorderen oder unteren Spinnwarzen, in denen die Glandulae piriformes ausmünden, an den Gegenstand, von dem sie sich herablassen will, an (Fig. 21 v.sp.u. 20 p). Es entsteht eine Haftscheibe, die unmittelbar in einen Faden ausläuft. Bei Herstellung des Rahmens und der Speichen des Netzes spielen die vier großen, auf großen Spinnröhren der mittleren und vorderen Spinnwarzen ausmündenden Glandulae ampullaceae die Hauptrolle. Der sehr elastische Faden der Fangspirale wird wahrscheinlich von den kleinen Glandulae aciniformes (Fig. 20 p), soweit sie auf den mittleren Spinnwarzen in kleinen Röhren ausmünden, geliefert. Die klebrigen Tröpfchen aber, mit denen die Fangspirale besetzt ist (Fig. 29), liefern die sechs Glandulae aggregatae (Fig. 20 ag), die auf drei nahe beieinander stehenden großen Spinnröhren der hinteren Spinnwarzen ausmünden. Die Glandulae tubuliformes (Fig. 16 t) treten erst später, bei Herstellung des Eikokons, in Tätigkeit und gelangen deshalb erst beim reifen Weibchen zur vollen Entwickelung. Beim Netzbau wechselt, wie aus obigem hervorgeht, nicht nur die Tätigkeit des ganzen Körpers der Spinne fortwährend; es treten dabei auch verschiedene Drüsen in Funktion und diese komplizierte Tätigkeit ist instinktiv; denn sie erfolgt bei allen Tieren derselben Art in derselben Weise. Sie vollzieht sich freilich nicht maschinenmäßig; denn das Netz wird den Verhältnissen angepaßt. Reißt man vorsichtig einen Sektor des Netzes (ohne das betreffende Stück des Rahmens) fort, bevor das Netz ganz fertig ist, so wird zunächst der fortgerissene äußere Teil des Netzes, soweit er schon fertig war, wieder hergestellt, erst die Speichen und dann die Querfäden und dann erst wird das ganze Netz fertiggestellt. Mit den Hinterfüßen nach oben hängt die Spinne schließlich im Netz und fühlt mit den Vorderfüßen, wo eine Beute sich gefangen hat. Der Tastsinn ist in den Vorderfüßen äußerst hoch entwickelt. Fällt irgendein Fremdkörper ins Netz, so sucht die Spinne durch Zupfen an den Speichen festzustellen, an welcher Stelle des Netzes sich der Fremdkörper befindet und läuft dann vorsichtig auf der Speiche

Fig. 28. Netz einer Radnetzspinne. d mittlere Decke, a gegabelte Speiche, bc Seitenfaden zum Spannen einer schlaff gewordenen Speiche, l Anfang der Fangspirale, f und g Wendungen der Spirale.

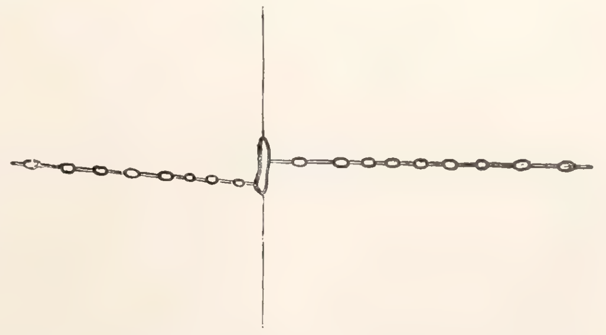


Fig. 29. Teil der Fangspirale eines Radnetzes mit klebrigen Tröpfchen.

entlang, um den Fremdkörper mittels Abbeißens der Fäden, die ihn tragen, zu entfernen. In dieser Weise wird möglichst wenig vom Netze zerstört. Viele Radnetzspinnen haben eine Wohnung neben dem Netz und verbinden diese mit dem Mittelpunkt durch einen Signalfaden. Bei dem Radnetz der Gattung Zilla fehlt sogar ein Sektor für diesen Faden. (Fig. 30). Es ist dieser Fall dadurch interessant, daß das erste Netz der jungen Spinne, oft auch noch das zweite und dritte, ein vollständiges Radnetz ist. Dann erst tritt, ohne äußere Veranlassung, die andere Netzform auf. Wir haben hier also eine Aenderung des Instinktes vor uns, die wahrscheinlich der Aenderung des Instinktes bei den Vorfahren unserer Spinne entspricht (Chambers' Regel; „Biogenetisches Grundgesetz"). Die Fäden für den Eikokon liefern die sechs Glandulae tubuliformes, welche auf großen Spinnröhren der hinteren und mittleren Spinnwarzen münden. Außer der gemeinen Kreuzspinne, Aranea (Epeira) diadema und der Winkelradnetzspinne, Zilla, gehören zu den Radnetzspinnen eigentümlich bestachelte Tropenformen (Gasteracantha) und die in den Tropen häufigen großen Nephila-Arten (Fig. 24), deren Fäden man versucht hat, technisch zu verwenden. In ein Gitter von kleinen Kästchen schließt man mehrere Tiere dieser Gattung ein und haspelt allen zugleich den schönen gelben Seidenfaden direkt aus den Spinnspulen heraus. Zu den größten Arten dieser Gattung gehören in Westafrika Nephila turneri und Nephila constricta, in Ostafrika und Madagaskar N. madagascariensis, in Südostasien (einschließlich Carolinen und Neu-Guinea) Nephila maculata. Unsere gemeinste, im Gebüsch ihr Netz ausspannende Radnetzspinne ist Meta reticulata. Ihr Netz hat im Gegensatz zu dem der meisten anderen Arten eine mehr geneigte Stellung und ist besonders zum Fange schwebend fliegender Insekten (Mücken usw.) geeignet. Die Buckelspinne, Cyclosa conica, stellt in ihrem Radnetz aus Beuteresten und anderen Fremdkörpern ein senkrechtes Band her, in dessen Mitte sitzend die bucklige Spinne schwer zu sehen ist. Die oft gelb geringelten Arten der Gattung Argyope (Argiope) stellen in ihrem Netze aus flockigem Spinnstoff, der allen Spinnwarzen entstammt, weiße Bänder von bestimmter Form her. Manche zu den Radnetzspinnen gehörende Arten bauen kein Radnetz, sondern ein zeltförmiges aus regelmäßigen viereckigen Zellen bestehendes Netz. Dahin gehört die über die Tropen der alten Welt verbreitete Cyrtophora citricola mit sechs paarig gestellten Höckern am Hinterleibe. Die Linyphiidae (Fig. 26 d) stellen im Gebüsch usw. deckenförmige Netze her und lauern an der Unterseite dieses Netzes. Unregelmäßige Fäden über der Decke sind klebrig und bringen fliegende Insekten zu Fall. Den Linyphiiden schließen sich an die Micryphantidae, zu denen die kleinsten unserer Spinnen gehören. Sie leben meist zwischen Moos, und ziehen dann nur einzelne Fäden. Viele von ihnen werden im Winter reif und viele zeichnen sich im männlichen Geschlecht durch eigenartige Kopfaufsätze aus. Da diese Aufsätze oft mit der Augenstellung nichts zu tun haben, muß man sie wohl als Schmuck auffassen. Zu den Micryphantiden gehört auch die Gattung Erigone, deren kleine dunkel gefärbten Arten auch noch im erwachsenen Zustande zu den Luftschiffern gehören. Da sie sich oft unerwartet an unseren Kleidern einstellen, haben sie den Namen Glückspinnen bekommen. Die Kugelspinnen, The-

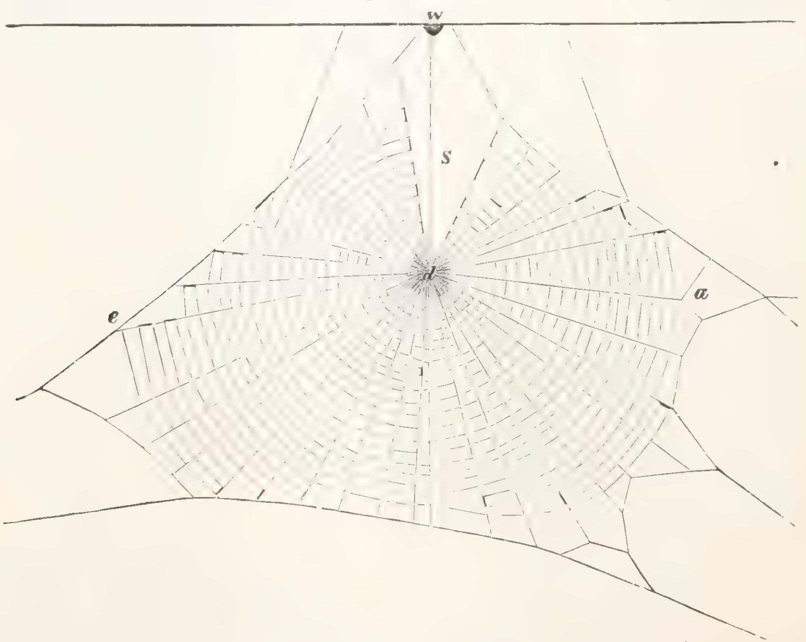


Fig. 30. Netz einer Zilla. S Signalfaden, w Wohnung.

ridiidae, ziehen büschelförmig, meist von einer oberen Wohnung ausgehende klebrige Fäden. Verwickelt sich ein fliegendes Insekt in den Fäden, so wird es von der Spinne mit einer Gespinstmasse, die aus großen lappenförmigen Drüsen durch weite Spulen entleert wird, beworfen. Als Werforgan dient eine Reihe langer gesägter Borsten am Hintertarsus (Fig. 31). Einige Theridium-Arten sind geschickte Ameisenfänger.

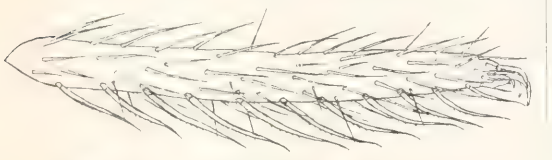


Fig. 31. Hintertarsus von Theridium.

Zu den Kugelspinnen gehört auch die Gattung Latrodectus, die über die Tropen und Subtropen der ganzen Erde verbreitet ist und fast überall in dem Gerücht steht, daß ihr Biß auch für den Menschen tödlich sein könne. Die Arten sind kaum einen Zentimeter lang, meist schwarz gefärbt und oft mit leuchtend roten oder gelben Zeichnungen am Hinterleibe versehen. Die südeuropäische Art wird Malmignatte oder Karakurte, die neuseeländische Art Katipo genannt. Alle Arten stellen entweder, wie unsere Steatoda bipunctata in Häusern oder zwischen niederen Pflanzen in Gärten usw. ihr Büschelnetz her. Bei einigen Gattungen (Asagena usw.) besitzt das Männchen zwischen Abdomen und Cephalothorax einen Stridulationsapparat. Zu den Theridiiden rechnet man auch kleine silber- glänzende Formen (Argyrodes), die ihre Fäden in den Netzen großer Spinnen ziehen; ferner feine, fadenförmige Spinnen der Gattung Ariamnes. Büschelnetze mit eigenartig gekräuselten Fangfäden stellen die Dictynidae her. Die Fangfäden entstammen hier der mit sehr feinen Spulen besetzten, unter den Spinnwarzen stehenden Spinnplatte (Cribellum) und werden durch eine regelmäßige Haarreihe am Metatarsus des 4. Beinpaares, dem Calamistrum (Fig. 32 ca), gekräuselt. Die Tetragnathidae haben Hörhaare auch an den Schenkeln. Es sind meist langgestreckte, blattknospenförmige Tiere. Sie sitzen mit nach vorn und nach hinten ausgestreckten Beinen an Zweigen. Als weiterer Vertreter dieser Familie, speziell in den Tropen, ist die Gattung Leucauge (früher Argyroepeira) zu nennen, deren Arten meist durch Silber- oder Goldglanz ausgezeichnet sind und ein fast wagerechtes Radnetz zum Fange schwebend fliegender Insekten (wie unsere Gattung Meta) herstellen. An die Tetragnathiden schließen sich an die mit Spinnplatte versehenen Uloboridae, die dadurch interessant geworden sind, daß in Venezuela eine Art Uloborus republicanus vorkommt, deren Individuen, Radnetz an Radnetz webend, einen Raum ausfüllen, um gemeinsame Sache zu machen, die also gesellig lebt. Hyptiotes gleicht den Knospen der Fichte, auf der sie mit ihren gekräuselten Fäden einen Kreissektor webt, zum Verwechseln (Fig. 26e). Aus der Familie der Eresidae (Fig. 26f) leben die Arten der Gattung Stegodyphus ebenfalls gesellig, indem sie dichte Gespinste, oft von einem Baum zum anderen herstellen. Bei einer auch bei uns (auf Heideboden) vorkommenden Art, Eresus cinnabarinus, zeichnet sich das Männchen durch schön roten, mit 4 schwarzen Flecken gezeichneten Hinterleib aus. Die Sicariidae (Fig. 26g) sind durch 3 Augenpaare ausgezeichnet. Die langbeinigen, unter ihrem lockeren Netz in Häusern hängenden Pholcidae (Fig. 26h) sind meist an 2 Gruppen von je 3 großen Augen kenntlich. Die Mimetidae machen Jagd auf andere Spinnen und sind durch eine Reihe langer Fangstacheln am Vordermetatarsus ausgezeichnet. Die Archaeidae zeichnen sich durch einen hohen Kopf aus und die Dinopidae durch die großen, nach vorn gerichteten hinteren Mittelaugen.

Zu den Stichotrichiae (Fig. 5) gehören an erster Stelle die Agelenidae, deren Hauptvertreter die Labyrinthspinne ist. Age(a)lena stellt im Rasen und niederen Gebüsch ein Trichternetz her und hat ihren Namen daher bekommen, daß sie ihren Kokon oft in einem labyrinthartigen Gewebe, das unter Benutzung eines zusammengerollten trockenen Blattes oder Stückes Rinde zustande kommt, unterbringt. Auch die Winkelspinne unserer Häuser (Tegenaria) und eine unten an Kiefernstämmen ihren zierlichen Trichter bauende Art (Textrix) gehören hierher. Eine durch ihre Augenstellung ausgezeichnete Gattung dieser Familie, Myro, ist der einzige Vertreter der Spinnen auf den Inseln des ausgedehnten Südmeeres, z. B. auf den Kerguelen. Da diese Gattung auch in Südafrika, Südamerika und Neuholland vorkommt und wegen des lange dauernden Eistadiums der Ageleniden zur Verschleppung durch Meeresströmungen sehr geeignet ist, wird ihr Vorkommen auf jenen Inseln durchaus erklärlich. Es schließen sich an die Ageleniden an die mit einem Cribellum versehenen, unter Steinen und Rinde lebenden Amaurobiidae und die kleinen, im Moos usw. lebenden Hahniidae, die sich durch die in gerader Querreihe stehenden 6 Spinnwarzen auszeichnen. Einen theridienartigen Eindruck machen die, besonders in den Tropen vorkommenden Zodariidae mit nicht gezähntem Mandibelende und die in den Wüsten Südwestafrikas lebenden, durch spitz vorragende Mandibelbasis ausgezeichneten Ammoxenidae.

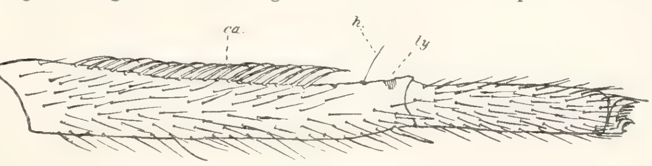


Fig. 32. Hinterfuß von Dictyna. ca Calamistrum; h Hörhaar; ly lyraförmiges Organ.

Zu den Saltigradae (Fig. 26i) gehört nur die Familie der Salticidae. Die Springspinnen haben oft vorzügliche Anpassungsfarben und nähern sich ihrer Beute durch katzenartiges Beschleichen. Manche unter ihnen sind Ameisen täuschend ähnlich. Dahin gehört unser Salticus (Myrmarachne) formicarius. Andere gleichen hartschaligen Käfern zum Verwechseln (Ballus, Coccorchestes). An sonnenbeschienenen Wänden und Steinen findet man die kleinen schwarz und weiß quergebänderten, dem Gestein oft sehr ähnlichen Zebraspringspinnen (Epiblemum). Interessant sind die Springspinnen dadurch, daß die Männchen oft schön gefärbt oder eigenartig geformt sind, daß sie mit erhobenen Vorderfüßen vor den Weibchen allerlei Bewegungen und Tänze ausführen (Habrocestum, Astia, Euophrys usw.). Eine Art Australiens Saitis volans hat einen stark verbreiterten Hinterleib. Ob dieser aber wirklich als Fallschirm dient, wie man behauptet hat, oder ob es sich auch hier nur um einen Schmuck des Männchens handelt, bedarf noch einer weiteren Prüfung. Die weibliche Springspinne schließt sich selbst mit ihren Eiern ein und entbehrt deshalb der Glandulae tubuliformes (Fig. 20t), die zur Herstellung des Eikokons dienen.

Die Laterigradae (Fig. 26k) sind, ebenso wie die Saltigradae, durch vorzügliche Form- und Farbenanpassungen ausgezeichnet. Sie haben einen flachen Körper und bewegen sich, wie Krabben, auch seitwärts und rückwärts. Die Vorderbeine sind lang und dienen zum Fange, die meist kurzen Hinterbeine nur zum Anklammern. Die Misumenidae sind zum Fange der Bienen an den Vorderbeinen mit zwei dichten Stachelreihen versehen. Sie gleichen oft den Blüten, auf denen sie sitzen, in Form und Farbe, können sogar ihre Farbe nach der Farbe der Blüte wechseln. Sie wissen, wenn sie eine Biene gefangen haben, den Hinterleib derselben so zu wenden, daß der Stachel nach außen sticht. Die Philodromidae und Xysticidae besitzen die Farbe der Baumrinde oder des Erdbodens, auf dem sie leben. Die unter lockerer Rinde sich verbergenden Philodromiden, namentlich aber die Gattung Coriarachne sind blattartig dünn. Einige Diaeidae gleichen trockenen Flecken an Blättern, auf denen sie sitzen. Beine und Vorderkörper sind blattgrün, der Rücken des Hinterleibes braun. Die Aphantochilidae des tropischen Amerikas gleichen stacheligen Ameisenarten, und die zu den Stephanopidae gehörende Phrynarachne (Ornithoscatoides) gleicht Vogelkot so vollkommen, daß Schmetterlinge sich auf sie setzen, um zu saugen und dann gefangen werden.

Unter den Citigradae zeichnen sich die Lycosidae oder Wolfspinnen dadurch aus, daß sie ihren Eiersack stets mit sich führen, teils zwischen den Kiefern (Pisaura Fig. 26l), Dolomedes usw. teils an die Spinnwarzen angeheftet (Lycosa, Fig. 26 m usw). Sie sind dadurch befähigt, ihre Eier jedem Sonnenstrahl zuzuführen und können die Eier selbst auf den höchsten Bergen und im höchsten Norden zur Entwickelung bringen. Der Kokon wird hergestellt, indem erst eine kleine Scheibe gewebt wird, die Eier darauf entleert werden, ein zweites Scheibchen über den Eiern gewebt wird und schließlich die Ränder unter ständigem Drehen der Scheiben zwischen den Beinen miteinander verwebt werden. Vor dem Ausschlüpfen der Jungen lockert die Mutter die Naht, läßt später die Jungen durch Vorhalten eines Fußes den Rücken besteigen und trägt sie nun bis zur ersten Häutung mit sich umher. Einige Wolfspinnen (Arctosa, Tarentula, Hogna usw.) stellen mehr oder weniger tiefe Röhren her, an deren Mündung die Eier der Sonne ausgesetzt werden. Zu ihnen gehören diejenigen Arten, die in Südeuropa vom Volke Taranteln genannt werden und deren Biß nach dem Volksglauben den Taranteltanz zur Folge haben soll. Die Arten der Gattungen Dolomedes und Pirata laufen geschickt auf dem Wasser und tauchen auch, indem sie an Pflanzen unter die Oberfläche des Wassers gehen. Den Wolfspinnen schließen sich die durch 2 isolierte Augen vorne am Kopfe ausgezeichneten oft mit nur 2 Krallen versehenen großen tropischen Ctenidae und die mit Cribellum versehenen Zoropsidae an. Den Uebergang zu den Clubioniden bilden die Zoridae, denen die dritte Fußkralle ganz fehlt.

Unter den Polytrichiae sind die Wasserspinnen Argyronetidae die interessantesten. Unsere Argyroneta aquatica ist unter Wasser am Hinterleibe stets mit einer Luftschicht umgeben und besitzt deshalb unter Wasser Silberglanz. Die Luft wird zurückgehalten durch sammetartige Behaarung und durch Fäden, mit denen die Spinne den Hinterleib mittels der Hinterfüße überzieht. Da die Spinne meist rücklings im Wasser sitzt und kriecht, wird die Luft nach den Stigmen hingedrängt. Erneuert wird die Luft, indem die Spinne die Spitze des Hinterleibes aus dem Wasser streckt. Die Wasserspinne bewegt sich im Wasser auf Fäden, die ihre Straßen darstellen. Ein eigentliches Fangnetz stellt sie nicht her. Sie lebt von Wasserasseln und Insektenlarven und fängt diese besonders nachts. Bei Tage hält sie sich meist in einer Behausung auf, die an Wasserpflanzen angeheftet ist. Um dieselbe herzustellen, webt die Spinne zunächst eine fast wagerechte, lockere Decke, holt, indem sie die Hinterbeine über dem Rücken kreuzt, Luft von der Oberfläche, streift diese unter der Decke ab und baut mittels der so geschaffenen Form weiter. Im oberen Teil der Luftglocke werden auch die Eier abgelegt. Zur Ueberwinterung begibt sich die Spinne oft in Höhlungen von Pflanzenwurzeln, Schneckengehäuse usw. Eine verwandte Gattung Desis kommt auf Korallenriffen vor. Die mit Cribellum versehenen Psechridae und Tengellidae leben in den Tropen. Die ersteren stellen zwischen den Brettstützen der Bäume ein Deckennetz her. Die Oxyopidae, meist ausgezeichnet durch 4 Reihen von je 2 Augen (Fig. 26 n), leben frei auf niederen Pflanzen. Ihre Beine sind mit langen brüchigen Stacheln reich besetzt. Die Senoculidae Südamerikas sind durch 2 weit von den andern getrennte große Augen vorn am Kopfe ausgezeichnet.

Unter den Tubitelae sind besonders die

Clubionidae und unter ihnen in Südamerika die Anyphaeninae sehr artenreich. Sie führen fast ausschließlich ein nächtliches Leben. Bei Tage trifft man die meisten von ihnen in Gespinst eingehüllt unter Rinde oder in einem zusammengesponnenen Blatte. Sie sind dann unscheinbar gefärbt, hell oder braun. Nur einige lebhaft gefärbte, z. T. metallisch glänzende Arten (Micaria usw.) findet man im Sonnenschein. Von der in Südamerika sehr artenreichen Unterfamilie der Anyphaeninen kommt bei uns nur eine Art, Anyphaena accentuata vor, ausgezeichnet durch zwei dunkle Längsflecke, auf dem hell gefärbten Abdomen. In Südafrika, Neuseeland und Neuholland fehlt die Unterfamilie ganz. Da dieselbe nun in dem mitten auf dem Bauche des Hinterleibes liegenden Stigma einen entschieden ursprünglichen Charakter besitzt, wäre ihr Fehlen im Süden der alten Welt ganz unverständlich, wenn früher eine Landverbindung zwischen den Südspitzen der Kontinente existiert hätte. Einige amerikanische Tubitelen gleichen Ameisen zum Verwechseln (Myrmecium, Sphecotypus). Die großen an Wänden und Bäumen, oft mit ihrem Eiersack umherlaufenden krabbenförmigen Sparassidae trennt man meist als Familie ab. Eine in Tropenhäusern überall vorkommende Art dieser Familie ist Heteropoda regia. Die mehr oder weniger flachgedrückten Gnaphosidae (Drassidae) leben besonders in dürren Gegenden unter Steinen. Einige unter Rinde vorkommende Formen (Hemicloea) sind blattartig dünn. An sie schließen sich die zu den Krabbenspinnen überführenden Platoridae Südamerikas an.

f) **Phalangida** (Opilionidae). **Weberknechte** (Kanker). Die Phalangiden sind träge und trotzdem oft wenig versteckt lebende Tiere. Manche sitzen, weithin sichtbar, an Wänden und Baumstämmen und werden doch von Vögeln usw. nicht oder kaum gefressen. Sie müssen also eine Schutzvorrichtung haben. Und in der Tat finden wir bei allen Phalangiden 2 Stinkdrüsen, die vorn an den Seiten des Cephalothorax münden. Bei unseren frei lebenden Arten sind diese Drüsen freilich meist sehr klein und verbreiten einen kaum merklichen Geruch. Es ist also anzunehmen, daß noch eine weitere Schutzeinrichtung hinzukommt. Wichtiger wird diesen Formen eine ebenfalls allen gemeinsame Eigenschaft sein, das starke Vorwalten fester Skeletteile den Weichteilen gegenüber. Mit ihren oft umfangreichen hartschaligen Beinen und ihrer festen Körperhaut auf einem verhältnismäßig kleinen Rumpf (Fig. 33) gewähren die Phalangiden Raubtieren aller Art zweifellos eine schlechte oder minderwertige Nahrung. Manchen Feinden entziehen sich die langbeinigen Formen vielleicht auch durch ihre als Taster rings weit vorgestreckten Beine und durch die Fähigkeit, diese Beine bei Gefahr abwerfen zu können (Autotomie). Die Troguliden sind wegen ihrer geringen Beweglichkeit am Boden schwer aufzufinden, zumal da die Chitinhaut erdfarbig und oft mit Höckern besetzt ist. Mittels eines klebrigen Hautdrüsensekrets halten diese Höcker sogar Erdpartikelchen fest. Was den Nahrungserwerb anbetrifft, so spielen die langen Beine des 2. Paares eine wichtige Rolle. Die Phalangiden nähren sich nämlich von unbeweglichen oder von kaum beweglichen tierischen Stoffen, namentlich von abgestorbenen Insekten; einige Arten auch von lebenden Schnecken. Wegen ihrer Unbeweglichkeit sind diese Nährstoffe mittels des Gesichtssinnes nicht



Fig. 33. Ein Phalangium eierlegend. Nach Henking.

leicht zu finden und ebenso versagt der Geruchssinn, weil die kleinen Körper wenig riechen. Nur der Tastsinn ist zum Auffinden geeignet. Mit den langgestreckten Tastbeinen, namentlich denen des 2. Paares, können die Phalangiden leicht eine große Fläche absuchen. Alle inneren Organe der Phalangiden sind stark verkürzt. Das Zentralnervensystem besteht aus einer oberen und einer unteren Schlundmasse. Das Herz besitzt nur 2 Ostienpaare und die Atmungsorgane sind nur in einem Paar vorhanden. Trotz ihrer geringen Beweglichkeit besitzen die Phalangiden Röhrentracheen und diese in einer Form, wie wir sie schon bei den Pseudoskorpionen kennen gelernt haben; feine Röhren, die aus einem weiten Basalstamm entspringen. Die Stigmen liegen an der Basis des Abdomens, nur bei den Cryptostemmen am Hinterrande des Cephalothorax. Bei den langbeinigen Formen sind auf den Schienen der 8 Beine je 2 akzessorische freie, kreisförmige Stigmen vorhanden, die mit den Tracheen im Innern in Verbindung treten. Die Blindschläuche des Mitteldarmes sind, den verschiedenen Graden in der Verkürzung des Körpers entsprechend, verschieden entwickelt. Als Exkretionsorgane sind 2 gewundene Schläuche vorhanden, die als Endbläschen beginnen und jederseits zwischen der 3. und 4. Coxa ausmünden. Malpighische Gefäße fehlen. Die Geschlechtsdrüsen bilden mit den Ausführungsgängen einen geschlossenen Ring. Als äußere Organe treten hier zum ersten Male, im weiblichen Geschlecht eine Lege-

röhre (Ovipositor) (Fig. 33), im männlichen Geschlecht ein Penis auf. Nur bei den Cryptostemmen fehlt beides. Dafür ist bei diesen am Ende des 3. Beinpaares im männlichen Geschlecht ein hochentwickelter Klammerapparat vorhanden. Bei den anderen Gruppen sind die männlichen Cheliceren oft stark entwickelt, bisweilen so stark, daß beide zusammen fast dem übrigen Körper an Gewicht gleichkommen (Rhampsinitus. Gurnia). Daß es sich hier nicht nur um ein Organ zum Festhalten, sondern auch um einen Schmuck handelt, läßt der hornartige obere Fortsatz bei Phalangium opilio (cornutum) erkennen. Die meisten Phalangiden sind im Herbst erwachsen, weil dann die meisten Insekten absterben und reiche Nahrung bieten. Zur Befruchtung sucht das Männchen nach einigem Klopfen mit den Tastbeinen sich dem Weibchen zwischen dessen Vorderbeinen gegenüberzustellen. Dann heben sich die Körper etwas, der Penis wird hervorgestülpt und eingeführt. Die Eier legt das Weibchen mittels der langen Legeröhre in die Erde. Die jungen Tiere sind oft den alten recht unähnlich, so daß man sie sogar in andere Gattungen gestellt hat. Die Familien unterscheiden sich in folgender Weise:

I. Es sind zwei wohlentwickelte Augen vorhanden; der Körper ist hinter dem letzten Beinpaar nicht eingeschnürt; die Stigmen befinden sich an der Basis des Hinterleibes.

A. Die Füße sind alle mit nur einer einfachen Fußkralle versehen; die Maxillarpalpen sind dünn. Palpatores (Plagiostethi).

a) Die Palpen enden mit einer Kralle. Phalangidae. Ueber die ganze Erde verbreitet.

b) Die Palpen sind krallenlos.

α) Der Cephalothorax ist vorn in zwei Fortsätze verlängert, welche die Cheliceren und Palpen kapuzenartig mehr oder weniger einschließen. Trogulidae. Fast nur im paläarktischen und nearktischen Gebiet.

β) Die Cheliceren und Palpen sind frei.

* Die Cheliceren sind länger als der ganze Körper und sehr kräftig, dienen zum Zerbrechen von Schneckengehäusen. Ischyropsalidae. Im paläarktischen und nearktischen Gebiet.

** Die Cheliceren sind kürzer als der Körper und weniger kräftig. Nemastomidae. Im paläarktischen und nearktischen Gebiet.

B. Die Füße der beiden hinteren Beinpaare sind entweder mit 2 Krallen oder mit einer, jederseits eine Nebenkralle tragenden Kralle versehen; die Palpen sind kräftig, ihr Endglied ist flachgedrückt und bedornt.

a) An den Hinterfüßen sind 2 Krallen vorhanden. Laniatores (Mecostethi).

α) Nur die letzte Dorsalplatte ist frei. Oncopodidae. Nur auf den Sundainseln gefunden.

β) Die 4 hinteren Dorsalplatten sind frei.

* Die hinteren Hüften sind sehr groß und mit der ersten Bauchplatte völlig verwachsen. Gonyleptidae. Fast nur in Südamerika vorkommend.

** Die Hinterhüften sind kaum größer als die anderen und nur an der Basis mit der ersten Bauchplatte verwachsen.

† Die Palpen sind mit Stacheln versehen, welche auf Fortsätzen stehen.

° Auch an den Schenkeln der Palpen sind Stacheln vorhanden. Epidanidae. Von Hinterindien bis Australien verbreitet.

°° Die Schenkel der Palpen sind unbestachelt. Biantidae. In Afrika und Indien gefunden.

†† Die Palpen sind nicht mit echten, auf Fortsätzen stehenden, Stacheln versehen. Assamiidae. Von Australien bis Afrika verbreitet.

b) Die Hinterfüße tragen eine Kralle, die jederseits mit Nebenkrallen versehen ist. Insidiatores, Familie Triaenonychidae. Auf allen drei südlichen Kontinenten vertreten.

II. Die Augen fehlen vollkommen; der Körper ist zwischen Cephalothorax und Abdomen eingeschnürt; die Stigmen befinden sich am Ende des Cephalothorax. Ricinulei. Familie Cryptostemmidae. Im tropischen Afrika und Südamerika.

g) Acarida. Milben. In den Milben haben wir die zweite formenreiche, lebenskräftige Gruppe der Spinnentiere vor uns. Während wir bei den echten Spinnen eine Weiterentwickelung der Spinnorgane an die Spitze unserer Betrachtung stellen mußten, tritt uns hier die Reduktion des Körpers und seiner Teile in ihrer Weiterentwickelung entgegen. Schon in den Pseudoskorpionen und Koenenien lernten wir Kleinformen kennen und bei den ersteren wurden auch die Vorteile der geringen Körpergröße genannt. Die Milben bilden eine umfangreichere Gruppe, die sich wahrscheinlich schon zu einer Zeit von den anderen Arachniden abzweigte, als die Atmungsorgane noch auf dem Vorder- und Hinterkörper zugleich vorkamen. Die allmähliche Reduktion der verschiedenen Organsysteme ist es, die uns hier besonders interessiert und zwar müssen an erster Stelle die Atmungsorgane genannt werden, weil die Art ihrer Ausbildung Anlaß zur Aufstellung eines Systems der Milben gegeben hat, eines Systems allerdings, das um so künstlicher sich zeigt, je weiter es ausgebaut wird. Gehen wir von den Formen aus, deren Stigmen am Hinterleibe liegen, den Cyphophthalmi und Notostigmata, von Formen, die zu den Phalangiden überführen, so stoßen wir zunächst auf die Metastigmata (Ixodidae), bei denen zwei Stigmen vorhanden sind und hinter dem 4. Beinpaar liegen (Fig. 34). Bei den Mesostigmata (Parasitidae und Argasidae) liegt das Stigmenpaar zwischen dem 3. und 4. Beinpaar, bei den Parastigmata (Uropodidae) zwischen dem 2. und 3. Beinpaar, bei den

Heterostigmata (Tarsonemidae-Weibchen) zwischen den Palpen und dem 1. Beinpaar, bei den Stomatostigmata (Labidostomidae) zwischen den Cheliceren und den Palpen und bei den Prostigmata (Bdellidae, Trombidiidae, Hydrachnidae, Halacaridae) vor den Cheliceren. Dann kommen die Formen, die am Vorderkörper mehr als 2 Stigmen besitzen. Zwei Paare sind vorhanden (das hintere freilich ohne Tracheen) bei den Holothyrida (Holothyridae), 4 Paare bei den Cryptostigmata (Oribatidae). Gar keine Stigmen besitzen die Astigmata (Sarcoptidae, Tyroglyphidae, Demodicidae, Eriophyidae). Zu den Astigmata gehören aber auch die Männchen der Tarsonemidae, die Hoplodermatidae (Hoplophoridae), die von den Oribatidae kaum zu trennen sind und die Larven aller Milben, z. T. auch die Nymphen. Daß die Larven bei den Milben in der Entwickelung voranschreiten, kann nicht wundernehmen, da es sich bei den Milben doch um Reduktionsformen handelt. Natürlich schwindet das Tracheensystem nicht immer auf genau derselben Größenstufe. Es spielen dabei die Lebensäußerungen eine wichtige Rolle. Ein Herz kennt man nur noch bei wenigen Milben, den Ixodiden, Holothyriden und einigen Parasitiden. Ein vollkommener Verdauungskanal mit in den Enddarm einmündenden Malpighischen Gefäßen ist nur noch bei einem Teil der Milben vorhanden (Ixodidae, Parasitidae, Tyroglyphidae usw.). Bei den Prostigmata endet der Darm, wie bei einigen Insektenlarven (Bienen, Ameisenlöwen usw.) blind. Die Malpighischen Gefäße münden dann meist noch in den früheren After und bilden einen vorn gegabelten, weiten Schlauch. Bei den Tarsonemiden schwindet auch die Ausmündung dieses Schlauches, jedoch erst

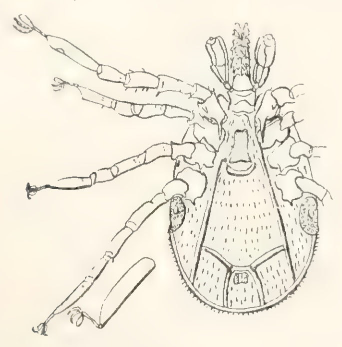


Fig. 34. Ein Ixodes-Männchen. Nach Stiles. Bauchseite.

nach der Embryonalentwickelung. Bei den Ixodiden und Notostigmaten sind neben den Malpighischen Gefäßen noch Coxaldrüsen vorhanden. Bei den Cyphophthalmen fand man nur Coxaldrüsen. Das Zentralnervensystem ist so stark konzentriert, daß sich oft kaum eine Grenze zwischen dem oberen und unteren Schlundganglion erkennen läßt. Als Sinnesorgane kommen bei den größeren Formen meist noch 2 oder 4 Augen vor (Notostigmata, Cyphophthalmi, Prostigmata); bei den Prostigmata findet sich oft auch noch ein mittlerer Augenfleck. Hörhaare kommen vor bei den Oribatiden und bei vielen Trombidiiden. Ein Geruchsorgan wurde am Vorderfuß der Ixodiden nachgewiesen. Tasthaare sind weit verbreitet In der Ausbildung der Geschlechtsorgane schließen sich die Milben eng den Phalangiden an. Die Geschlechtsdrüse bildet oft mit den beiden Ausführungsgängen einen geschlossenen Ring (Cyphophthalmi, Ixodidae, Trombidiidae). Bei allen kleineren Formen aber ist nur ein Ausführungsgang vorhanden. Ein Penis scheint fast nie ganz zu fehlen. Eine Legeröhre kommt aber scheinbar nur noch bei den Notostigmata, Cyphophthalmi und Ixodidae vor. Zur Eiablage können sich die Tiere nämlich, ihrer geringen Größe wegen, verkriechen und so einen für die Eier geeigneten Versteck erreichen. Zur Paarung schlüpft das Männchen meist derart unter das Weibchen, daß die Geschlechtsöffnungen aneinander liegen. Oft ist ein Beinpaar beim Männchen stark verdickt und zum Festhalten des Weibchens mit Klammern versehen, entweder das 1. Paar (Aleurobius) oder das 2. (Parasitidae) oder das 4. (Tarsonemus, Hydrachnidae) oder wie bei Cryptostemma das 3. Paar (Pteronyssus usw.).

Die Reduktion des Körpers, die den Bau des Tieres beherrscht, macht sich auch schon bei der Embryonalentwickelung geltend, so daß diese hier bei Fragen nach der Verwandtschaft völlig versagt. Das 4. Beinpaar wird beim Embryo angelegt, um dann während des Larvenstadiums völlig zu verschwinden. Die postembryonale Entwickelung verläuft bei den verschiedenen Milbenarten in äußerst verschiedener Weise. Ja, es entwickeln sich bisweilen die Individuen derselben Brut verschieden. So können sich die ersten Eier eines Weibchens von Pediculopsis graminum (intrauterin) gleich, mit Ueberspringung des sechsbeinigen Larvenstadiums, zur achtbeinigen Nymphe (♀) oder gar zum ausgebildeten Tier, zum Prosopon (♂) entwickeln, während die letzten Eier desselben Weibchens ein freilebendes Larvenstadium durchmachen müs-

sen. Die erste Häutung findet bei manchen Milbenarten (z. B. Trombidium) schon im Ei statt. Die Eihülle wird gesprengt und der Embryo erscheint von einer neuen Hülle, dem Apoderma, umgeben. Man nennt das neue Stadium Deutovum (Schadanophanstadium). In derselben Weise kann noch ein Tritovum entstehen (bei Myobia). Dann folgt das bei den meisten Milben freilebende, bisweilen aber (Pteroptus, Leiognathus usw.) an die Entwickelung im Ei unmittelbar sich anschliessende 6-beinige Larvenstadium. An das Larvenstadium schließen sich bisweilen 3 freilebende 8-beinige Nymphenstadien an (Oribatidae), jedes durch eine Häutung eingeleitet. Das mittlere Nymphenstadium kann auch ein Ruhestadium sein und zur Ausbreitung der Art dienen. Es wird dann Hypopus genannt (Glycyphagus domesticus usw.). Oft fällt eins der Nymphenstadien aus (Tetranychus, Parasitidae usw.) oder zwei fallen aus (Eriophyes, Hydrachna usw.) oder alle drei (Tarsonemus, Phytoptipalpus usw.). Endlich kann auch das erste und letzte Stadium ein Ruhestadium sein (Trombidium, Diplodontus usw.) und wird dann Nymphochrysallis und Teleiochrysallis genannt. Diese beiden Ruhestadien werden dann bisweilen (Trombidium) durch Auftreten eines Apoderma in das freilebende Nymphenstadium oder in das ausgebildete Tier (Prosopon) übergeführt, wodurch noch ein Nymphophan- oder Teleiophanstadium zustande kommt. Selten werden Milben im 6-beinigen Stadium geschlechtsreif; bisweilen nur die Männchen (Podopolipus). Stets nur vier Beine besitzen die Eriophyidae.

Nachdem sich die Respirationsorgane als künstliches und deshalb unzureichendes Einteilungsprinzip erwiesen haben, dürfen wir auch von den anderen inneren Organen bei diesen in Reduktion begriffenen Tieren nichts Besseres erwarten. Es kann deshalb vorläufig nur eine Uebersicht der Familien nach äußeren Merkmalen für praktische Zwecke gegeben werden.

I. Die Stigmen liegen, entweder dorsal oder ventral, an der Basis des Abdomens, dessen Gliederung stets noch leicht erkennbar ist.

A. An den 4 ersten Abdominalsegmenten befindet sich dorsal jederseits je ein Stigma; am Cephalothorax befinden sich vorn jederseits 2 Augen. Notostigmata Familie Eucaridae. Die wenigen bekannten Arten dieser Gruppe wurden im Mittelmeergebiet gefunden.

B. An dem 1. Abdominalsegment kommt ventral jederseits 1 Stigma vor; am Kopfteil mündet jederseits eine Drüse auf einem Höcker aus, vor diesem Höcker steht höchstens ein Auge. Cyphophthalmi. Familie Sironidae. Die Arten kommen im äthiopischen, im orientalischen Gebiet und im Mittelmeergebiet, bis Krain nordwärts vor.

II. Die Stigmen fehlen entweder ganz oder sie kommen am Vorderkörper, allenfalls hinter dem 4. Beinpaar vor; eine Gliederung des Abdomens ist nicht oder kaum erkennbar.

A. Die Mundteile treten zu einem Rüssel zusammen, der mit vielen Widerhaken versehen ist; die Stigmen befinden sich meist hinter dem 4. Beinpaar. Ixodidae.

B. Die Mundteile bilden keinen mit zahlreichen Widerhaken versehenen Rüssel; die Stigmen stehen nie hinter dem 4. Beinpaar, oft fehlen sie ganz.

a) Größere, derbe, meist gefärbte, im reifen Zustande meist mit Atmungsorganen versehene Tiere.

α) Die Füße enden mit einem von zwei sehr kleinen Krallen eingefaßten Haftorgan; bei den Nymphen und dem Prosopon befindet sich über den Hüften der Beine ein Stigma, das sich meist als Rinne nach vorn fortsetzt. Parasitidae.

β) Die Füße sind mit größeren Krallen und daneben oft mit Haftorganen versehen; über den Hüften befindet sich kein Stigma.

* Augen fehlen ganz; an den Füßen ist entweder nur 1 oder es sind 3 Krallen, aber keine Haftorgane vorhanden. Oribatidae.

** Augen sind meist vorhanden; an den Füßen sind 2 Krallen, oft auch Haftorgane, selten (bei der Larve) 3 Krallen vorhanden.

† Die Geschlechtsöffnung liegt in einer festen, fast die Hinterhälfte des Bauches einnehmenden Platte; die Taster sind 3- bis 4-gliedrig; meist im Meere lebende Tiere. Halacaridae.

†† Die Geschlechtsöffnung liegt höchstens in einer kleinen Platte.

⁰ Es sind an den Füßen meist längere Haare zum Schwimmen, niemals aber Haftorgane vorhanden; im Süßwasser lebend. Hydrachnidae.

⁰⁰ Es sind an den Füßen nie Schwimmhaare, meist aber Haftorgane als Läppchen oder eigenartige Haare vorhanden; auf dem Lande lebend. Trombidiidae.

b) Sehr kleine (nicht ½ mm lange), zarte, größtenteils durchscheinend weißliche, meist tracheenlose, oft parasitisch lebende Arten.

α) Es sind mindestens 3 Beinpaare vorhanden.

* Die Beine sind mehr als 3-gliedrig; der Körper ist nicht wurmförmig, im Hinterteil nicht fein geringelt; z. T. parasitisch lebende Tiere. Sarcoptidae.

** Die Beine sind sehr kurz, 3-gliedrig; der Körper ist lang, fast wurmförmig, der Hinterleib fein geringelt; stets parasitisch lebende Tiere. Demodicidae.

β) Es sind nur 2 Beinpaare vorhanden; der Körper ist lang, fast wurmförmig; der Hinterleib fein geringelt; in Pflanzengallen lebende Tiere. Eriophyidae.

Die Ixodidae (Fig. 34) oder Holzböcke, auch Zecken genannt, saugen sich an Wirbeltiere an, um die umfangreichen Darmfortsätze mit Blut zu füllen. Vollgesogen besitzen sie Erbsen- bis Bohnengröße. Sie sind neuerdings dadurch interessant geworden, daß sie Krankheitserreger, Hämatozoen übertragen. Zuerst erkannte man in dem Boophilus (Rhipicephalus) annulatus und decoloratus den Ueberträger des tropischen Texasfiebers der Rinder. Jetzt weiß man, daß Ixodes

ricinus in Deutschland eine ähnliche, aber weniger gefährliche Krankheit der Rinder, daß Rhipicephalus bursa eine Krankheit der Schafe, daß Argas persicus, die besonders Federvieh, aber auch den Menschen, wie Wanzen, nachts überfällt, das Rückfallfieber der östlichen Mittelmeerländer, Ornithodorus moubata das afrikanische Rückfallfieber überträgt.

Die Parasitidae (Gamasidae), auch Käfermilben genannt, leben besonders in zerfallenden Stoffen, Kot, Tierleichen usw., doch auch vom Honig in Hummelnestern, bei Ameisen, einzelne auch parasitisch. Manche Arten sind dadurch interessant, daß sie sich im Nymphenstadium durch größere Tiere von einem Futterplatz zum anderen tragen lassen und dann fälschlich für Parasiten gehalten werden. Auf Käfern findet man den Parasitus (Gamasus) coleoptratorum, der sich frei auf dem Körper bewegt und einige Uropoda-Arten, die sich mittels eines aus dem After abgeschiedenen Stieles festsetzen. Auf Hummeln kommt Parasitus fucorum (bombo-rum) vor. Auf Säugetiere und auch auf den Menschen gehen die Nymphen von Laelaps marginatus. Auch sie sind keine echten Parasiten und können doch nervöse Personen zur Verzweiflung bringen. Die Arten der Gattungen Dermanyssus und Liognathus (Leiognathus), als Vogelmilben bekannt, überfallen nachts Hühner, Kanarienvögel usw.

Die Oribatidae oder Hornmilben haben vielfach ein käferartiges Aussehen. Manche Arten sind mit eigenartigen Anhängen, Stacheln, Schuppen usw. versehen und dann oft sehr schwer als Tiere zu erkennen. Sie leben an Baumstämmen, im Moos usw.

Die Hydrachnidae oder Wassermilben leben im Süßwasser, teils frei schwimmend (hierher die bis 8 mm lange rot und schwarze Hydrachna geographica, die Gattung Arrhenurus usw.), teils zwischen den Kiemen der Muscheln (Atax). Die Nymphen des an Pflanzen kriechenden, roten Limnochares aquaticus findet man als rote Körnchen an Wasserinsekten.

Unter den Trombidiidae oder Laufmilben ist besonders die schönrote Sammet- oder Erdmilbe zu nennen. Die schön rote Farbe scheint Trutzfarbe zu sein, denn das Tier wird von vielen Räubern nicht gefressen. Die Larve dieser Milbe ist als August- oder Erntemilbe (französisch rouget, lateinisch fälschlich Leptus autumnalis genannt) oft sehr lästig, da sie sich beim Menschen ansaugt und einen juckenden Ausschlag, das sogenannte Herbst-Erythem, erzeugt. Die Larve von Trombidium parasiticum (Ottonia trigona) kommt als rotes Körnchen an Heuschrecken usw. vor. Die Spinnmilbe, Tetranychus telarius, tritt an Linden mitunter so häufig auf, daß diese schon im August ihr Laub verlieren. Sie überwintert in einer besonderen Form an den Stämmen unter Flechten usw. Diese Gattung und die Gattung Bdella (Schnabelmilbe) werden oft auch als Vertreter besonderer Familien betrachtet.

Die Sarcoptidae in dem hier angewendeten Sinne bilden sicher keine einheitliche Gruppe, sie schließen sich teils den Oribatiden, teils den Parasitiden, teils vielleicht auch den Trombidiiden an. An erster Stelle sei die Krätzemilbe Sarcoptes scabiei (Fig. 35) genannt, die in der Haut des Menschen Gänge bohrt und dadurch die juckende „Krätze" erzeugt. Einige bei Haustieren vorkommende Krätzmilben, S. canis, equi, ovis, suis, unterscheiden sich von S. scabiei sehr wenig, werden aber für besondere Arten gehalten, weil sie, auf den Menschen übertragen, gewöhnlich von selbst wieder verschwinden. Die Räudemilben Psoroptes (bovis, equi, ovis) und Chorioptes (equi, bovis usw.) stellen keine Gänge her, erstere sollen Blutsauger, letztere nur Hautfresser sein. Auf Vögeln erzeugen die Arten der Gattung Cnemidocoptes eine Art Räude. Cnemidocoptes gallinae verursacht beim Haushuhn den Ausfall der Federn, Cnemidocoptes mutans befällt besonders die Füße des Federviehes. Die ebenfalls auf Vögeln lebenden Pterolicheae, Analgeae usw. erzeugen keine eigentliche Räude, dringen aber doch zuweilen in die Haut ein. Die Dermaglypheae leben in den Spulen der Federn. Die Canestriniinae leben auf Käfern. Die Listrophorinae halten sich mittels eigenartiger häutiger Klammerorgane an den Haaren verschiedener Säugetiere fest. Unter den freilebenden Arten (Tyroglyphinae) ist besonders die Hausmilbe Glycyphagus domesticus zu nennen, die oft als Hausplage auftritt. Gewöhnlich wird sie durch Möbel mit schlecht entfettetem und gereinigtem Polstermaterial eingeführt. Die Käsemilbe Tyroglyphus siro und die Mehlmilbe Aleurobius farinae kommen nicht nur am Käse und im Mehl, sondern in allen möglichen animalischen und vegetabilischen Stoffen vor. Die Tarsoneminae erzeugen z. T. Pflanzengallen. Eine Art Tarsonemus hominis wurde bisher nur in Krebsgeschwüren des Menschen gefunden.

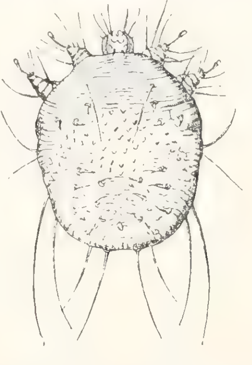


Fig. 35. Krätzemilbe des Menschen. Nach Leuckart.

Die Demodicidae oder Haarbalgmilben leben parasitisch in der Haut und zwar in den Haarbälgen und Talgdrüsen des Menschen und der Säugetiere. Die beim Menschen vorkommende Art (Demodex foliculorum Fig. 36) erzeugt die als Mitesser bekannten kleinen Geschwüre an Nase, Backen und Stirn.

Die Eriophyidae (Phytoptidae) oder Gallmilben bringen an den Blättern, seltener an anderen Teilen der Pflanzen sog. Gallen hervor. Die Milbengallen sind im Innern durch zarte, früher für Pilzfäden (Erineum) gehaltene fadenartige Zellwucherungen ausgezeichnet. Meist befinden sie sich an der Unterseite des Blattes und treten oberseits als Pusteln

(Gallen der Weingallmilbe Eriophyes vitis usw.) oder als kegelförmige Aufsätze (Gallen der Lindengallmilbe Eriophyes tiliae) hervor. Die Wucherungen werden durch ein Enzym, das den Speicheldrüsen der Milbe entstammt, veranlaßt. Zwischen den Fäden befinden sich die den Fäden sehr ähnlichen, langgestreckten Milben. Die Galle gewährt den Milben Schutz gegen Regen usw. Die Fäden bilden ihre Nahrung. An der unveränderten Blattfläche vermögen sie nicht zu saugen. Einige Gallmilben leben als Einmieter oder Inquilinen in den Gallen anderer. Raubmilben sind ihre Feinde. Das Wachstum der Gallen hört mit der Vegetationsperiode auf. Die Milben der ausdauernden Gewächse gehen während des Winters unter die Schuppen der Knospen des nächsten Jahres.

h) **Pentastomata** (Familie Linguatulidae). **Zungenwürmer.** In den Pentastomen haben wir, ebenso wie in den Milben, Reduktionsformen vor uns, aber Reduktionsformen ganz anderer Art. Nicht Verringerung der Körpergröße, sondern parasitäre Lebensweise hat hier die Reduktion herbeigeführt. Durch Wirtswechsel ist bei den Pentastomen alle selbsttätige Nahrungssuche ausgeschaltet. Deshalb ist das obere Schlundganglion mit den zugehörigen Sinnesnervenendigungen geschwunden. Nur eine dünne Kommissur verläuft über den Oesophagus. Ebenso sind die Lokomotionsorgane geschwunden (Fig. 37). Nur bei der Larve sind noch 2 Paare stummelartiger, in 2 Krallen endigenden Beine und ein Bohrapparat zum Durchbohren der Darmhaut des Wirtes vorhanden (Fig. 38). Tracheen fehlen ebenfalls und die Bewegung des Blutes wird in genügender Weise durch den Hautmuskelschlauch bewirkt. Es bleibt also nur ein einfacher wurmförmiger Körper, der, wie der Hinterkörper der beiden letzten Milbenfamilien, dicht geringelt ist. Da das Tier in seiner Nahrung schwimmt, können sogar die äußeren Mundwerkzeuge fehlen. Nur 4 Haken zum Anheften und ein Verdauungskanal, der mit einem Saugapparat beginnt und mit einem Enddarm endet, sind vorhanden. Daß wir trotz der Wurmform keinen Eingeweidewurm vor uns haben, erkennen wir an den quergestreiften Muskeln, an dem Bau des Verdauungskanals und besonders an der 4-beinigen Larve. Was in den schon genannten Organsystemen gespart wird, wird für den Geschlechtsapparat, der, wie bei allen Entoparasiten, hochentwickelt ist, reichlich verausgabt. Kompliziert gebaut ist der Kopulationsapparat, besonders beim Männchen. Außerordentlich groß ist die Produktion von Eiern. Der nach der Befruchtung lange, gewundene, mit befruchteten Eiern gefüllte Uterus fällt im Körper der größeren Tiere (♀) besonders in die Augen. Ziemlich umfangreich sind außer den Geschlechtsorganen und dem Darm nur noch 2 dem Darm der Länge nach anliegende, an der Basis zweier Klammerhaken ausmündende Drüsen. Man hält diese „Hakendrüsen", wie die Speicheldrüsen der Krätzemilben, für Reizorgane, die eine reichere Absonderung von Nährflüssigkeit zu bewirken haben. Ferner müssen die auf allen Ringen, besonders an der Bauchseite zahlreich vorkommenden, auf stigmenartigen Oeffnungen ausmündenden Hautdrüsen genannt werden, die wahrscheinlich mit der Einkapselung des Tieres in Beziehung stehen, indem ihr Sekret auf die Gewebe des Wirtes einen Reiz besonderer Art ausübt.

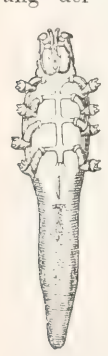


Fig. 36. Haarbalgmilbe des Menschen. Nach Mégnin.

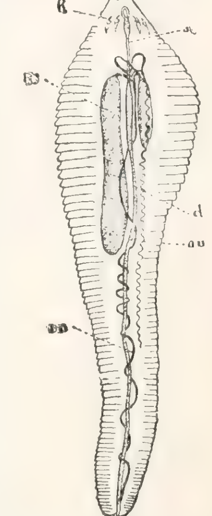


Fig. 37. Linguatula rhinaria ♀. Nach Leuckart. d Darm, h Haken, oe Oesophagus, ov Ovarium, rs receptacula seminis, va Uterus.

Die ausgebildeten Tiere kommen in den Nasenhöhlen der Fleischfresser, in der Lunge der Schlangen usw. vor. Die Eier gelangen mit dem Schleim entweder durch Niesen direkt nach außen oder sie werden verschluckt und mit dem Kot entleert, um dann von dem zweiten Wirt, einem Gras-, Körnerfresser oder omnivoren Tier aufgenommen zu werden. Von Linguatula rhinaria (Pentastomum taenioides und denticulatum) kommt das erste Entwickelungsstadium bei Grasfressern, und beim Menschen vor. Die Eier gelangen mit Salat oder auch direkt durch Umgang mit Hunden (von denen in Berlin 6,7% mit Linguatula behaftet sind), in den Magen des Menschen. Die Larve durchbohrt die Darmwand und gelangt mittels der Blut- und Lymphbahnen in Lunge, Niere oder Leber. Hier kapselt sie sich ein und ist dann in 6 Monaten zur weiteren Ueberführung reif. Jetzt muß der Parasit (meist mit den Geweben des Wirtes) von einem Raubtier, z. B. einem Hunde gefressen werden, um durch

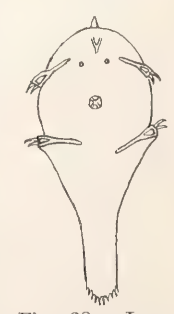


Fig. 38. Larve eines Pentastomen. Nach Leuckart.

den Oesophagus in dessen Nasenhöhle aufzusteigen. Beim Menschen sterben die Tiere schließlich ab. Sie werden in Berlin bei 12 % aller sezierten Erwachsenen in der Leber gefunden. In den Tropen kommt eine andere Art Porocephalus constrictus beim Menschen vor.

Literatur. **E. Blanchard,** *L'organisation du règne animal Arachnides. Paris 1852 ff.* — **B. Weissenborn,** *Beiträge zur Phylogenie der Arachniden. Jen. Zeitschr. f. Naturw. Bd. 20 1887 S. 33 ff.* — **F. Dahl,** *Die Hörhaare und das System der Spinnentiere. Zool. Anz. Bd. 37, 1911, S. 522 ff.* — **E. Simon,** *Les arachnides de France. Paris 1874 bis 84.* — **E. Ray Lankester,** *Notes on certain points in the anatomy and genetic characters of scorpions. Trans. Zool. Soc. London Vol. 2 1885 p. 372 ff.* — **E. J. Beck,** *Description of the muscular and endoskeletal Systems of Scorpio ib. p. 339 f.* — **K. Kraepelin,** *Scorpiones und Pedipalpi. Berlin 1899.* — **Derselbe,** *Die sekundären Geschlechtscharaktere der Skorpione, Pedipalpen und Solifugen. Mitt. d. naturw. Mus. Hamburg Bd. 25 1908 S. 181 ff.* — **O. Schröder,** *Die Sinnesorgane der Skorpionkämme, Zeitschr. f. wiss. Zool. Bd. 90 1908 S. 436 ff.* — **R. J. Pocock** *Scorpions and their geographical distribution. Nat. Sci. Vol. 4 1894 p. 353 ff.* — **K. Kraepelin,** *Die geographische Verbreitung der Skorpione. Zool. Jahrb. Syst. Bd. 22 1905 S. 321 ff.* — **A. Brauer,** *Beiträge zur Kenntnis der Entwickelungsgeschichte des Skorpions. Zschr. f. wiss. Zool. Bd. 57 1894 S. 402 ff. u. Bd. 59 1895 S. 351 ff.* — **A. Menge,** *Ueber die Scherenspinnen. Schr. d. naturf. Ges. Danzig Bd. 5 Heft 2 1855.* — **A. Croneberg,** *Beitrag zur Kenntnis des Baues der Pseudoskorpione. Bull. Soc. Imp. Naturalistes Moscou 1888 p. 416 ff.* — **C. J. With** *Chelonethi. The Danish Exped. to Siam Bd. 3 Kopenhagen 1906.* — **L. Koch,** *Uebersichtliche Darstellung der europäischen Chernetiden. Nürnberg 1873.* — **H. Reeker,** *Zur Lebensweise der Afterskorpione. 22. Jahresber. westf. Prov.-Ver. f. Wiss. 1894 S. 103 ff.* — **E. Green,** *Curious habits of Chelifer. Zoologist (4) Vol. 12 1908 p. 159 f.* — **J. Barrois,** *Memoire sur le développment des Chelifers. Revue Suisse Zool. T. 3 1896 p. 461 ff.* — **H. M. Bernard,** *The comparative morphology of the Galeodidae. Trans. Linn. Soc. London Zool. N. S. Vol. 6 1896 p. 305 ff.* — **P. Bertkau,** *Ueber Sinnesorgane in den Tastern der Solpugiden. Zool. Anz. Bd. 15 1892 S. 10 u. 110.* — **H. Rühlemann,** *Ueber die Malleoli der Solpupiden. Zeitschr. f. wiss. Zool. Bd. 91 1908 S. 599 ff.* — **K. Kraepelin,** *Palpigradi und Solifugae. Berlin 1901.* — **R. J. Pocock,** *The nature and habits of Pliny's Solpuga. Nature Vol. 57 1898 p. 618 ff.* — **R. Heymons,** *Biologische Beobachtungen an Asiatischen Solifugen. Anh. d. Abh. Ak. d. Wiss. Berlin 1901.* — **Derselbe,** *Die flügelförmigen Organe der Solifugen. S.-B. d. Akad. d. Wiss. Berlin 1904 VIII.* — **C. Börner** *Beiträge zur Morphologie der Arthropoden. Zoologica Heft 42 1904.* — **H. J. Hansen and W. Sörensen,** *The Order Palpigradi. Ent. Tidskr. Årg. 18 1897 p. 223 ff.* — **A. Rucker,** *Further observations on Koenenia. Zool. Jahrb. Syst. Bd. 18 1903 S. 401 ff.* — **Pergande,** *Habits of a specimen of Thelyphonus. Proc. ent. Soc. Washingt. Vol. 1 1886 p. 42 ff.* — **G. Marx,** *Contributions to the knowledge of the life history of Arachnida. Ib. Vol. 2 1891 p. 252 ff. and 3 1894 p. 54.* — **F. Dahl,** *Analytische Bearbeitung der Spinnen Norddeutschlands. Schrift naturw. Ver. Schlesw.-Holst. Bd. 5 1883 S. 13 ff.* — **Derselbe,** *Ein Versuch den Bau der Spinnen physiologisch zu erklären. Zool. Jahrb. Syst. Bd. 25 1907 S. 339 ff.* **C. Apstein,** *Bau und Funktion der Spinndrüsen der Araneida. Arch. f. Naturg. Bd. 55 I 1889 S. 29 ff.* — **E. Widmann,** *Ueber den feineren Bau der Augen einiger Spinnen. Ztschr. f. wiss. Zool. Bd. 90 1908 S. 258 ff.* — **E. Oetcke,** *Histologische Beiträge zur Kenntnis der Verdauungsvorgänge bei den Araneiden. Berlin 1911.* — **E. Simon,** *Histoire naturelle des Araignées. Paris 1892 bis 1903.* — **C. Chyzer et L. Kulczynski,** *Araneae Hungariae. Budapesti 1891 bis 1897.* — **F. Dahl,** *Das System der Spinnen. S.-B. d. Ges. naturf. Fr. Berlin 1904 S. 93 ff. und Zool. Anz. Bd. 29 1905 S. 614 ff.* — **Derselbe,** *Die Lycosiden oder Wolfspinnen Deutchlands und ihre Stellung im Haushalte der Natur. Nova Acta Bd. 88 Nr. 3 Halle 1908.* — **Derselbe,** *Versuch einer Darstellung der psychischen Vorgänge in den Spinnen. Vierteljahrsschr. f. wiss. Philos. Bd. 9 1884 S. 84 ff. u. 162 ff.* — **H. C. Mc Cook,** *American spiders and their spinningwork, Philadelphia 1889 bis 93.* — **W. Wagner,** *L'industrie des Araneina. Mém. Acad. Sci. St. Pétersb. (7) T. 42 N. 11 1894.* — **R. J. Pocock,** *The genus Poecilotheria its habits etc. Ann. Mag. nat. Hist. (7) Vol. 3 1899 p. 82 ff.* — **P. Westberg,** *Aus dem Leben der Spinnen. Korr.-Bl. d. Naturf.-Ver. Riga Heft 43 1900* — **H. Henking,** *Die Wolfspinne und ihr Eikokon. Zool. Jahrb. Syst. Bd. 5 1891 S. 185 ff.* — **J. H. Fabre,** *Souvenirs entomologiques 8. et 9. Sér. Paris.* — **T. Bail,** *Beobachtungen über das Leben der Wasserspinne. Naturw. Wochenschr. N. F. Bd. 6 1907 S. 623 ff.* — **W. F. Purcell,** *Development and origin of the respiratory organs in Araneae. Quart. Journ. micr. Sci. Vol. 54 1909 p. 1 ff.* — **G. Kautzsch,** *Ueber die Entwicklung der Agelena labyrinthica. Zool. Jahrb. Anat. Bd. 28 1909 S. 1 ff. u. Bd. 30 1910 S. 535 ff.* — **T. H. Montgomery,** *The development of Theridium. Journ. of Morphol. Vol. 20 1909 p. 29 ff.* — **J. R. Pocock,** *On the geographical distribution of Mygalomorphae. Proc. zool. Soc. London 1903 I p. 340 ff.* — **F. Dahl,** *Die Verbreitung der Spinnen spricht gegen eine frühere Landverbindung der Südspitzen unserer Kontinente. Zool. Anz. Bd. 37 1911 S. 270 ff.* — **J. C. C. Loman,** *Vergleichend anatomische Untersuchungen an Opilioniden. Zool. Jahrb. Suppl. VI Bd. 3 1902 S. 117 ff.* — **H. J. Hansen und W. Sørensen,** *On two orders of Arachnida. Cambridge 1904.* — **C. F. Roewer,** *Revision der Opiliones plagiostethi. Abh. d. naturw. Ver. Hamburg Bd. 19 Heft 4 1910.* — **J. C. C. Loman,** *Neue außereuropäische Opilioniden. Zool. Jahrb. Syst. Bd. 16 1902 S. 163 ff.* — **Derselbe,** *Ueber die geographische Verbreitung der Opiloniden. Zool. Jahrb. Syst. Bd. 13 1900 S. 71 ff.* — **H. Henking,** *Biologische Beobachtungen an Phalangiden. Zool. Jahrb. Syst. Bd. 3 1888 S. 319 ff.* — **E. Reuter,** *Zur Morphologie und Ontogenie der Acariden. Acta*

Soc. Sci. Fenniae T. 36 1909 N. 4. — **H. Henking**, *Beiträge zur Anatomie von Trombidium fuliginosum. Zeitschr. f. wiss. Zool. Bd. 37 1883 S. 553ff.* — **K. Samson**, *Zur Anatomie und Biologie von Ixodes ricinus. Zeitschr. f. wiss. Zool. Bd. 93 1909 S. 185ff.* — **A. Berlese**, *Acari etc. huiusque in Italia reperta. Patavii 1882 bis 97.* — **A. D. Michael**, *Oribatidae. Berlin 1898.* — **Derselbe**, *British Tyroglyphidae. London 1901 bis 03.* — **G. Canestrini und P. Kramer**, *Demodicidae und Sarcoptidae. Berlin 1899.* — **R. Piersig** u. **H. Lohmann** *Hydrachnidae and Halacaridae. Berlin 1901.* — **R. Piersig**, *Deutschlands Hydrachniden. Zoologica Heft 22 1897 bis 99.* — **F. Koenike**, *Acarina. Süßwasserf. Deutschlands Heft 12 1909 S. 13ff.* — **A. Nalepa**, *Eriophyidae (Phytoptidae). Berlin 1898.* — **Derselbe**, *Eryophyiden, Gallmilben. Zoologica Heft 61 1910 S. 167ff.* — **E. Neumann**, *Ixodidae, Berlin 1911.* — **W. Dönitz**, *Die wirtschaftlich wichtigen Zecken. Leipzig 1907.* — **G. H. F. Nutall and C. Warburton**, *Ticks. A Monograph of the Ixodidae. Cambridge 1908ff.* — **R. Leuckart**, *Bau- und Entwicklungsgeschichte der Pentastomen. Leipzig 1860.* — **C. W. Stiles**, *Bau und Entwicklungsgeschichte von Pentastomum proboscideum. Zeitschr, f. wiss. Zool. Bd. 52 1901 S. 85ff.* — **H. B. Spencer**, *The anatomy of Pentastomum teretiusculum. Quart. Journ. micr. Sci. N. S. Vol. 34 1893 p. 1ff.* — **M. Koch**, *Zur Kenntnis des Parasitismus der Pentastomen. Arbeiten aus d. pathol. Inst. Berlin 1906 S. 288ff.*

F. Dahl.

Arachnoidea.
Paläontologie.

1. Einleitendes. 2. Scorpionida. 3. Pseudoscorpionida. 4. Pedipalpa. 5. Araneida. 6. Phalangida, Ricinulei, Haptopoda, Phalangiotarbi, Anthracomarti. 7. Acarida.

1. Einleitendes. Zwei Umstände sind es, welche die Kenntnis fossiler Arachnoideen zu einer sehr lückenhaften machen: 1. Die Arachnoideen sind mit verschwindend wenigen Ausnahmen luftatmende Landbewohner, 2. ihr chitinöses Hautskelett ist wieder mit sehr wenigen Ausnahmen äußerst zart, wenig widerstandsfähig.

Fossile Reste sind — abgesehen von ganz vereinzelten Vorkommnissen im Silur, in der Trias (?), im oberen Jura und in der Kreide (?) — nur aus Land- und Süßwasserbildungen des Karbon und Tertiär bekannt. Weit über die Hälfte der etwa 300 fossilen Arachnoideenarten beherbergt der in- das marine Unter-Oligocän des Samlandes eingeschwemmte Bernstein, in welchem außerdem die feinsten Formdetails aufs köstlichste erhalten sind. Weit stehen in bezug auf Artenreichtum hinter dem Bernstein zurück die Süßwasserablagerungen des Oligocäns von Colorado, Wyoming, Aix (Provence) und des Miocäns von Rott und Oeningen.

Auch die karbonischen kohleführenden Ablagerungen von Ober-Schlesien, Böhmen, Sachsen, der Rheinpfalz, Frankreich, Belgien, England, Wales, Schottland, Neu-Schottland, Illinois, Arkansas zeigen bei weitem nicht den Artenreichtum des Bernsteins.

Von den unter den lebenden unterschiedenen Ordnungen sind auch fossil bekannt die Scorpionida, Pseudoscorpionida, Pedipalpa, Phalangida mit Ricinulei, Araneida, Acarida, zu denen noch 3 karbonische Gruppen, die †Haptopoda, †Phalangiotarbi, †Anthracomarti[1]) kommen, denen Pocock den Rang von Ordnungen zuerkennt. Fossile Solifugen, Pentastomen, Tardigraden und Pantopoden sind bislang nicht bekannt.

Für die Erhellung der Stammesgeschichte ist das fossile Material nahezu belanglos. Es hilft kaum zu mehr als zu einzelnen Vermutungen über Verbindungen zwischen Skorpionen und Pedipalpen, Skorpionen und Pseudoskorpionen, vielleicht der Pedipalpen mit mesothelen Araneiden; zwischen den einzelnen Ordnungen wirklich vermittelnde Glieder sind aber nicht bekannt.

Wenn die fossilen Vorkommnisse ein wahres Bild der Verbreitung der Formen gäben, würden die Arachnoideen insgesamt der nördlichen gemäßigten Zone entstammen und von hier aus sich vielleicht erst in jüngerer Zeit gen Süden verbreitet haben.

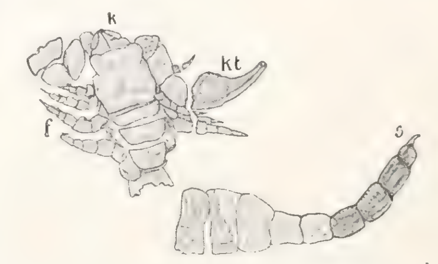


Fig. 1. †Palaeophonus nuncius Thor. und Lindstr. Ober-Silur (Ludlow); Wisby, Gotland. Oberseite des Cephalothorax und der 4 vorderen Abdominalsegmente, die 3 hinteren Abdominalsegmente zeigen nach Pocock die Unterseite, ebenso das Postabdomen. f einklauige Schreitfüße, k Scheere des Kieferfühlers, kt Kiefertaster, s Giftdrüse mit Stachel. Natürliche Größe. Aus v. Stromer nach Thorell und Lindström.

2. Scorpionida. Geologische Verbreitung Ober-Silur, Karbon, Oligocän der nördlichen gemäßigten Zone; jetzt Tropen und Subtropen.

Mit zu den überraschendsten Entdeckungen auf dem Gebiete der Paläontologie gehören die Funde von Skorpionen im jüngeren Obersilur (Ludlow-Stufe) der Insel Gotland (Wisby), Schottlands (Dunside, Lesmahagow und Pentlandhills) und von New York (Waterville). Der gotländer und die beiden schottischen Funde werden trotz mancher Differenzen einer Gattung zugerechnet † Palaeophonus Thor. u. Lindstr.; das New Yorker Exemplar gilt als

[1]) Ein vorgesetztes † bedeutet ausgestorben oder nur fossil bekannt.

Repräsentant einer anderen Gattung †Proscorpius Whitf. Der gotländer †Palaeophonus nuncius Thor. u. Lindstr. und der schottische †Palaeophonus caledonicus Hunt. (†Palaeophonus loudonensis Laur. ist zu unvollkommen erhalten, um eine Rolle zu spielen) ergänzen einander: an dem einen liegt die Oberseite, am anderen die Unterseite frei. Die auffallende Kürze

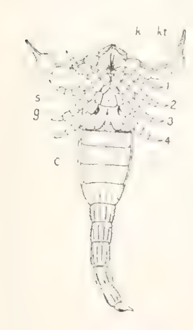


Fig. 2. †Palaeophonus caledonicus Hunt. (Hunteri Poc.). Ober-Silur (Ludlow); Lesmahagow, Schottland. Restauration der Ventralseite nach Pocock. 1 bis 4 Schreitfüße, c Kämme, g Genitalöffnung, k Kieferfühler, kt Kiefertaster, st Sternum. Natürliche Größe. Das Original wurde beim Brande des Museums von Kilmarnock zerstört. Nach Pocock.

und Kurzgliedrigkeit der Schreitfüße, deren Tarsenendglieder nur eine spitzige Klaue tragen (Apoxypodes Thor. u. Lindstr.), deren Coxae nach Pococks Auslegung des † Palaeophonus caledonicus alle vor dem fünfseitigen Sternum liegen, und deren zweite Coxae in der Mediane durch Sternite des zweiten Cephalothorakalsegments getrennt und nicht zu großen Kauladen ausgezogen sind, der nahe dem Vorderrande liegende Augenhöcker — bei † Palaeophonus nuncius ohne, bei † Palaeophonus caledonicus mit Medianaugen, Nebenaugen scheinen zu fehlen —, die tiefe hintere Querfurche des Cephalothorax und die wesentlich schwächere Entwickelung der Giftdrüse ergeben wohl Unterschiede gegenüber jüngeren Skorpionen, aber der Gesamthabitus mit allen anderen Charakteren zeigt den Skorpiontypus vollkommen ausgeprägt. Thorell und Lindström erachten †Palaeophonus mit vorne breit ausgeschnittenem Cephalothorax sogar den rezenten Skorpionen näherstehend als den aus dem Karbon bekannten Typen, bei welchen öfters der Cephalothorax vorne etwas vorgezogen ist. Das von Thorell und Lindström behauptete Vorkommen von Stigmen am 3. (nach Pocock dem 2.) Abdominalsterniten von † Palaeophonus nuncius wird von Pocock bestritten und †Palaeophonus darum nicht für einen Luftatmer, sondern für ein Wassertier erklärt.

Bei dem aus der Waterlime-Zone (Salina-group) von New York beschriebenen † Proscorpius Osborni Whitf. glaubte Whitfield zwei Klauen an den Tarsenendgliedern — wie bei allen jüngeren Skorpionen (Dionychopodes Thor. u. Lindstr.) zu sehen; da die Zahl der Schreitfußglieder bei dem betreffenden Exemplar nicht festzustellen ist, bleibt Whitfields Angabe unsicher. † Proscorpius hat einen vor dem randlich liegenden Augentuberkel etwas vorgezogenen Vorderrand des Cephalothorax. Außer medianen Augen waren randliche Nebenaugen festzustellen. Die Kiefertaster sind schlanker als bei † Palaeophonus. Auf der teilweise freiliegenden Unterseite sind 6 (!) gleichartige Abdominalsternite sichtbar. Stigmen waren nicht nachzuweisen, und Whitfield hält † Proscorpius darum für ein Wassertier. Nach den zutreffend erscheinenden Bemerkungen Whitfields über die Gelenkverbindung der Postabdominalsegmente mögen die silurischen Skorpione die Cauda nicht oder nicht so weit wie die Mehrzahl der lebenden über den Rücken zu schlagen vermocht haben.

Bei den in größerer Anzahl — 10 — bekannten Gattungen aus den kohleführenden Ablagerungen des Karbon Europas und Nordamerikas ist im allgemeinen größere Annäherung an die rezenten Typen zu erkennen durch lange Schreitfüße (Ausnahme: † Archaeoctonus Poc.), deren Lage zum Sternum der lebender Formen mehr oder weniger gleichkommt und deren Tarsenendglieder nun regelmäßig 2 Klauen tragen. Die Lage des medianen Augenhöckers ist teils noch wie bei den Silurskorpionen nahe dem Vorderrande des Cephalothorax, teils wie bei rezenten nahezu zentral (†Anthracoscorpio Kušta).

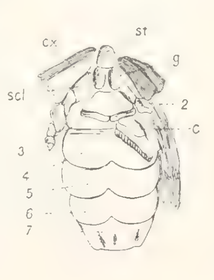


Fig. 3. †Eobuthus Holti Poc. Ober-Karbon; Sparth, Lankashire. Ventralseite, wenig restauriert. c Kamm, cx Coxae des 3., od. 3. u. 4. Schreitfußes, g Genitaloperkulum, scl entweder Segmente eines 4 Schreitfußes oder eines Anhangs am 1. Abdominalsegment, rt 2 bis 7 Sternite des 2. bis 7. Abdominalsegments. $^3/_4$ natürlicher Größe. Nach Pocock.

Thorell und Lindström hatten die karbonischen Skorpione als †Anthracoscorpii von den känozoischen Neoscorpii geschieden im wesentlichen nach den Merkmalen, daß der Vorderrand des Cephalothorax in der Mitte etwas vorgezogen ist, und daß die größen Medianaugen vor oder zwischen den lateralen Nebenaugen lägen. Das erste Merkmal besitzt keine allgemeine Gültigkeit, und das zweite beruht, wie A. Fritsch bei †Cyclophthalmus wenigstens feststellte, auf irrtümlicher Deutung von Tuberkeln als Nebenaugen. Pocock konnte für manche karbonischen Formen andere, auffällige Trennungsmerkmale zeigen. Bei †Eobuthus Fritsch (Oberkarbon; Böhmen, England) und †Isobuthus Fritsch (Oberkarbon; Böhmen) sind die Sternite des 4., 5. und 6. Abdominalsegmentes

hinten durch einen medianen, tiefen Einschnitt in zwei breit gerundete Lappen ausgezogen. Ferner ist, wenigstens bei †Eobuthus neben dem Genitaloperkulum eine Reihe von Skleriten zu erkennen. Entweder entsprechen diese Sklerite einem äußeren Aste des ursprünglichen Ventralanhanges[1]) am 1. Abdominalsegment oder den proximalen Teilen des 4. Schreitfußes. Das erste würde im Vergleich mit den übrigen Skorpionen einen völlig andersartigen und zwar wohl ganz altertümlichen Bau des ersten Abdominalsomiten bedeuten, das andere eine ganz ungewöhnliche Lage des 4. Schreitfußes. Noch kommt dazu, daß Pocock bei †Eobuthus das Fehlen von Stigmen anzunehmen sich gezwungen sieht und glaubt, daß die Atmungsorgane hier wie bei Limulus von den Sterniten der Abdominalsegmente bedeckt seien. Die so gebauten Formen faßt Pocock als †Lobosterni zusammen. Ihnen stellt er die in den wesentlichsten Zügen, besonders im Bau der Ventralseite mit hinten gerade abgeschnittenen Abdominalsterniten, den lebenden gleichen Skorpione als Orthosterni gegenüber, bei denen außerdem die Coxae des 3. und 4. Schreitfußes normal an die Seiten des Sternum stoßen. Zu den karbonischen Orthosterni rechnet Pocock:

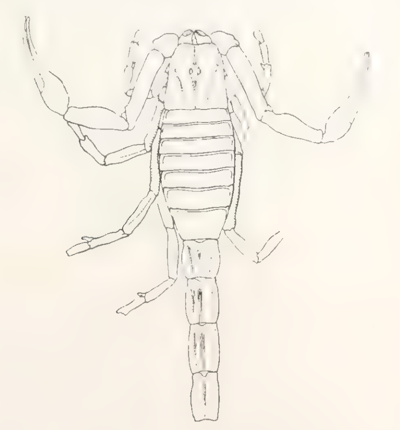


Fig. 4. †Anthracoscorpio Dunlopi Poc. Ober-Karbon; Drumgray, Schottland. Oberseite, wenig restauriert. 1/2 natürlicher Größe. Nach Pocock.

†Archaeoctonus Poc. (= †Eoscorpius Peach e. p., †A. glaber und tuberculatus Peach sp.) mit auffallend kurzen Schreitfüßen, deren 4. Paar gestreckt kaum bis zum Hinterrand des Abdomens reicht (Unterkarbon, Schottland).

†Cyclophthalmus Corda mit besonders großen Kiefertastern und Scheren (Unter-Karbon, Schottland; Oberkarbon, Böhmen).

†Anthracoscorpio (Kušta) Poc. (= †Eobuthus Fritsch e. p., †Eoscorpius Baldw. u. Sutcl.), schlanke Formen mit fast zentral liegendem Augenhöcker, mit schlanker langfingeriger Schere am Kiefertaster; †Anthracoscorpio Dunlopi Poc. ist mit etwa 13 cm Länge wohl der größte Skorpion (Oberkarbon, Wales, Schottland).

†Microlabis Corda mit langen, schlanken Kiefertastern und besonders schmaler, kurzer Hand (Oberkarbon, Böhmen).

Die Stellung anderer Gattungen bleibt unsicher, so von

†Palaeomachus Poc. (= †Eoscorpius H. Woodw. e. p., †P. anglicus Woodw. sp.) mit breiter langer Hand, schlanken Fingern und relativ kurzen Postabdominalsegmenten (Oberkarbon, England); †Feistmantelia Fritsch, deren Kämme kräftig gekörnelt erscheinen (Oberkarbon, Böhmen); †Eoscorpius M. u. W. s. str. (†Eoscorpius carbonarius M. u. W.), dessen letzter Abdominaltergit auffallend lang ist (Ober-Karbon, Illinois, ? England); †Mazonia M. u. W. ungewöhnlich durch die Zahl von 8 (bis 9 ?) Abdominalsegmenten, mit kurzer schmaler Hand mit großen Medianaugen (Oberkarbon, Neu-Schottland, Illinois, ? England).

Folgt man Pococks systematischem Prinzip, so müssen die silurischen Skorpione den karbonischen Orthosterni nahe gestellt werden als deren und der rezenten Skorpione Vorläufer, bei welchen das Cephalothorakalsternum noch um zwei (?) Schreitfußpaare weiter zurückliegt und bei denen die Coxae des zweiten Schreitfußpaares wegen der eingeschobenen Sklerite kaum schon als Kauladen gedient haben können.

Nach langer Pause ist erst wieder aus dem Tertiär, aus dem Bernstein im Unteroligocän des Samlandes, ein Skorpion erhalten, ein winziger Tityus †eogenus Menge, dessen Verwandte aus der Unterfamilie der Centrurinae (Familie Buthidae) heute in der Neuen Welt verbreitet sind.

In die Stammesgeschichte der Skorpioniden bringt das spärliche fossile Material naturgemäß nur äußerst wenig Licht. Der Stamm

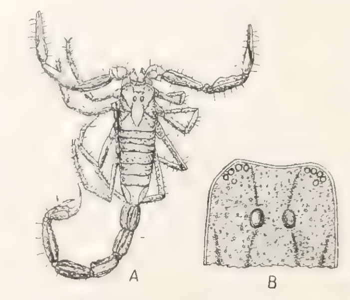


Fig. 5. Tityus †eogenus Menge. Unter-Oligocän, Bernstein, Samland. A Oberseite, dreimal vergrößert; b Vorderteil des Cephalothorax, stark vergrößert. Nach Menge.

der Skorpione ist der älteste überlieferte der Arachnoideen und wahrscheinlich auch der ursprünglichste. Zugleich ist er, wenigstens in den nach dem Prinzip der Orthosterni Poc. struierten Typen sehr konservativ. Die Umprägungen seit dem Silur beschränken sich hier auf die Erwerbung zweier Endklauen an den Tarsen, die (vielleicht schon im Silur) vom

[1]) Andeutung eines Spaltfußes wäre nach Pocock bei †Palaeophonus caledonicus in den Kämmen und den zwischen ihnen liegenden schmalen Plättchen am zweiten Abdominalsomiten zu sehen.

vom Karbon an ständig vorkommen (Voraussetzung: Einklauigkeit wäre das ursprünglichere), auf die Erwerbung längerer Schreitfüße, von denen die Coxae der zwei vorderen Paare zu Kauladen werden, auf die Verlagerung des Cephalothorakalsternum nach vorne, des medialen Augenhöckers nach hinten und eventuell auf die Erwerbung der Fächertracheen.

Ob die Lobosterni Poc. (? ohne Fächertracheen) ein etwa sekundär an das Wasserleben und Kiemenatmung angepaßter jüngerer Zweig sind, oder ob sie wegen der Skleriten am ersten Abdominalsegment als besonders alter Stamm oder Seitenstamm zu gelten haben, das würde erst durch die bis jetzt ungelösten Fragen nach der Herkunft der Skorpione zu entscheiden sein.

Für die Frage nach dem Ursprung der Skorpione ist ihr gänzlich unvermitteltes Auftreten im jüngeren Ober-Silur, ihr vollkommenes Fehlen in älteren marinen Faunen von grundlegender Bedeutung. Die Skorpione müssen, soweit heute geologische Ueberlieferung auslegbar ist, auf Landfesten entstanden sein. Die Heimat der Ahnen der silurischen Gattungen war wohl sicher jener alte, mindestens seit kambrischer Zeit existierende und gegen Ausgang des Silur wieder anwachsende Kontinent, der das alte Fennoskandia über den Norden des Atlantic hin mit dem kanadischen Schilde verband. Hier wurden, sicherlich in langen Geschlechterreihen, der altweltliche †Palaeophonus von dem neuweltlichen †Proscorpius geschieden. Von hier wurden diese im jüngeren Obersilur zusammen mit †Merostomen in die marinen Gebiete Gotlands und Schottlands geschwemmt, sowie in das an Marintieren arme Binnenbecken der Waterlime-Stufe der Salina-group von New York. An den Rändern derselben Kontinentalmasse finden wir Skorpione wieder in den karbonischen Steinkohlenablagerungen Europas und Nordamerikas, während beachtenswerterweise die Binnenseeablagerungen der Oldredfazies devonischer Zeit aus dem gleichen Landkomplex bislang keine Skorpionreste geliefert haben. Von dem alten kanado-fennoskandischen Kontinent sind die Skorpione wohl erst in jüngerer Zeit der Erdgeschichte gen Süden zu ihren heutigen Wohnsitzen verdrängt worden.

Ob die Ahnen der silurischen Skorpione bereits Landkriechtiere mit Tracheenatmung oder Wassertiere mit Kiemenatmung waren, ist — da die Frage der Atmung bei den silurischen Formen noch unentschieden und die Tradition über vorobersilurisches Leben der Länder höchst unvollkommen ist — nicht zu bestimmen, die Lage des Genitalorgans würde mehr für Wassertiere als Ahnen sprechen. Die vielfach und in jüngster Zeit wieder von Pocock wie Warburton ausgesprochene Meinung verwandtschaftlichen Zusammenhangs zwischen Skorpionen und den seit dem Algonkium nachgewiesenen, wasserbewohnenden, aber ursprünglich kaum marinen †Merostomen erfordert die Zuhilfenahme sehr vielfältiger Umformungen, für welche das paläontologische Material trotz der †Lobosterni keine sichere Handhabe bietet. Existiert solche Verwandtschaft, und die Möglichkeit ist um der gleichen Körpersegmentierung und der Fußzahl willen nicht von der Hand zu weisen, dann kann die Verbindung nicht zwischen den Silurskorpionen und ihren Zeitgenossen unter den Merostomen: †Eurypterus, †Slimonia, †Pterygotus, †Stylonurus usw. gesucht werden, die alle in bezug auf Extremitäten, Mundwerkzeuge, Seitenaugen vollkommen anders spezialisiert sind. Aber auch die kambrischen Merostomen wie †Strabops, †Sidneyia, †Amiella bieten keine direkten Brücken zu Skorpionen. Wenn die Sklerite neben dem Genitaloperkulum bei †Eobuthus wirklich Reste eines Fußastes am 1. Abdominalsegment repräsentieren, dann muß nach solchem sehr altertümlichen Charakter die Verbindung zwischen Skorpionen und Merostomen sehr weit zurückliegend, in vorkambrischer Zeit, vermutet werden (vgl. die Artikel „Gigantostraca" und „Xiphosura").

3. Pseudoscorpionida. Geologische Verbreitung: Unter- und Oberoligocän (Tertiär).

Unvermittelt treten im Bernstein des Unteroligocän Ostpreußens Angehörige der verschiedenen Hauptgruppen der Pseudoskorpione auf: Chelifer Geoffr. mit mehreren Arten und vereinzelt Chernes Menge, Obisium Leach., Cheiridium und Chthonius Koch; Chelifer kommt auch im oberoligocänen Süßwassermergel von Aix in der Provence vor.

4. Pedipalpa. Geologische Verbreitung: Oberkarbon, Oberoligocän.

Von Geißelskorpionen sind — nach Ausschluß der nur lebend bekannten Palpigradi — die beiden Hauptstämme der Uropygi und Amblypygi auch fossil bekannt.

Uropygi. Im Oberkarbon von Böhmen, England, Illinois tritt eine Gattung †Geralinura Scudd. (= †Protelyphonus Fritsch) mit mehreren Arten auf, die in ihrem ganzen Habitus an den lebenden



Fig. 6. †Geralinura (Protelyphonus). bohemica Kušta. Ober-Karbon; Rakonitz, Böhmen. Natürliche Größe. Aus Zittel.

Telyphonus Latr. sich enge anschließen; die Abschnürung der letzten 3 Abdominalsegmente ist höchstens eine weniger plötzliche. Die von Fritsch ausgesprochene Trennung zweier Gattungen. †Geralinura und †Protelyphonus ist nicht aufrecht zu erhalten, da das trennende Moment: Querteilung des Cephalothorax, nicht existiert (Pocock). †Geralinura wird vielleicht

am besten direkt mit Telyphonus vereinigt.

Amblypygi. Tarantuliden sind einmal aus dem kohleführenden Oberkarbon bekannt. In England (Süd-Wales, Straffordshire), Neuschottland (Cap Breton) und Illinois (Mazon Creek) wurden 3 Arten einer Gattung † Graeophonus Scudd. gefunden, deren

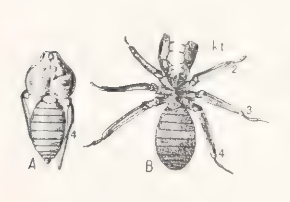


Fig. 7. † Graeophonus anglicus Poc. Ober-Karbon; Coseley bei Dudley, Wales. A Ober-Seite. B Unterseite eines anderen Exemplares, kt Kiefertaster, 2, 3, 4 Schreitfüße. Natürliche Größe. Nach Pocock.

breit herzförmiger Cephalothorax nach vorne schlank ausgezogen, und deren Abdomen schlank elliptisch ist; die Palpen waren kürzer gegliedert als bei den rezenten Tarantuliden und wohl weniger in horizontaler als vertikaler Richtung einklappbar. Tarantula Fabr. (= Phrynus Ol.) selbst soll im



Fig. 8. † Protolycosa anthracophila F. Röm. Ober-Karbon; Myslowitz, Oberschlesien. Oberseite. a After, abd Abdomen, g Genitalanhänge (?), k Basalglieder der Kieferfühler, kt Kiefertaster. $^3/_1$ natürlicher Größe. Nach Fritsch aus v. Stromer.

oberoligocänen Süßwassermergel von Aix (Provence) gefunden sein.

5. Araneida. Geologische Verbreitung: Oberkarbon, Tertiär.

Die Weberspinnen sind jetzt der reichst differenzierte Ast der Arachnoideen und zugleich der, von welchem das meiste fossile Material vorliegt. Im Oberkarbon besonders von Böhmen, dann von Schlesien, England, Nordamerika treten die ersten Formen auf, welche trotz mancher fremdartiger Details und meist unvollkommener Erhaltung als Araneiden bezeichnet werden müssen. In erster Linie sind es Formen mit gegliedertem (ob bei allen abgeschnürtem) Abdomen, mit gegliederten Anhängen an der Genitalregion?, den heute auf Sumatra beschränkten Lipisthiiden (Mesothelae) morphologisch nahestehend. Von den hier unterschiedenen Gattungen mit festerem Hautskelett wie † Arthrolycosa Harg., † Protolycosa Roem., † Pleurolycosa A. Fritsch, † Geralycosa und † Racovnicia Kušta, † Eocteniza Poc. zeigen einzelne, z. B. † Eocteniza, in ihrer Körperform auffallende Aehnlichkeit mit amblypygen Pedipalpen. Auch Opisthothelae sind wohl schon im Oberkarbon

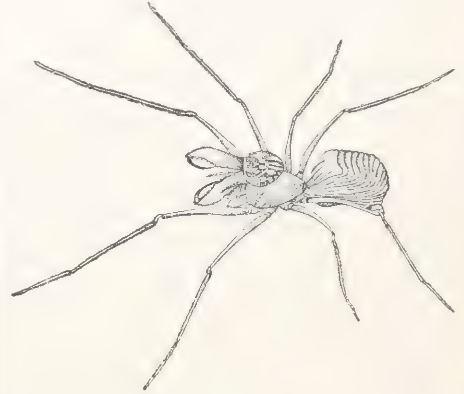


Fig. 9. † Archaea paradoxa Koch und Ber. Unter-Oligocän, Bernstein; Samland. Auffallender Höcker auf dem Cephalothorax, mächtige Palpen, sehr zarte Kieferfühler! $^3/_1$ natürlicher Größe. Aus Zittel.



Fig. 10. † Mizalia rostrata Koch und Ber. Unter-Oligocän, Bernstein; Samland. Cephalothorax vor den Augen schnauzenartig vorgezogen. $^3/_1$ natürlicher Größe. Aus Zittel.

vertreten: die schlanke † Archeaometa Poc. (Wales), ? † Pyritaranea, ? † Dinopilio A. Fritsch.

In großer Zahl — über 70 Gattungen — sind dann Araneiden aus dem Tertiär bekannt. Besonders zahlreich sind sie im Bernstein und im Oligocän von Wyoming und Kolorado, seltener im Oligocän von Aix, im Miocän von Rott und Oeningen. Sämtliche tertiären Formen sind zwar den heute lebenden Hauptfamilien einzuordnen, müssen aber mindestens zur Hälfte als erloschenen Gattungen angehörend betrachtet werden, von denen einzelne, wie † Archaea Koch,

† Mizalia Thor., † Gerdia Menge ganz fremdartig erscheinen. Sehr auffallend ist die geringe Zahl von 8 Gattungen, die dem Tertiär Europas und Nordamerikas gemeinsam sind, und auffallend die große Zahl von Orbitelarien in Nordamerika, dort fast die Hälfte der fossilen Formen ausmachend.

So reichhaltig auch das fossile Araneidenmaterial erscheinen mag, so hilft es doch nichts zur Klärung der Genesis der Ordnung und ihrer einzelnen Familien.

6. **Phalangida** (Opiliones), **Ricinulei, Haptopoda, Phalangiotarbi, Anthracomarti.** Geologische Verbreitung Oberkarbon, Oberer Jura, Tertiär (Unteroligocän).

Die Afterspinnen oder Weberknechte lassen sich vielleicht bis in das Oberkarbon verfolgen: in kohleführenden Ablagerungen von Ellismuire (Schottland) und Commentry (Frankreich) wurde eine Gattung † Nemastomoides Thev. († N. elaveris Thev.) gefunden, mit mehr oder weniger viereckigem Cephalothorax und großem achtgliedrigem Abdomen, das schwache seitliche Längsrinnen aufweist, Sonst sind Phalangiden in größerer Zahl nur im samländischen Bernstein gefunden und zwar vorwiegend Plagiosteten, die den lebenden Gattungen Phalangium, Opilio, Liobunum, Acantholophus, Platybunus, Nemastoma angehören; von Mecosteten ist im Bernstein die Gattung Gonyleptes nachgewiesen.

Im lithographischen Schiefer Bayerns ist ein eigentümlicher Spinnentyp gefunden worden, den E. Haase als † Stenarthron bezeichnete: An dem schlank spindelförmigen Körper sind Cephalothorax und Abdomen nicht abgeschnürt, am Ende des 5 bis 7gliedrigen Abdomens hängt ein kurzer Flagellum-artiger Fortsatz; die Schreitfüße sind sehr lang, dünn, die Cheliceren und dünnen Palpen sind ganz undeutlich erhalten. Haase stellt die Form zu den Palpigradi. Die Verbindung von Cephalothorax und Abdomen und die Form der Schreitfüße ist jedoch wesentlich Phalangiden-ähnlicher.

Von den vielfach an die Phalangiden angeschlossenen Ricinulei, mit schwacher Einschnürung zwischen Cephalothorax und Abdomen, mit beweglichen Cucullus am Vorderende des Cephalothorax, mit einem meist aus drei größeren und einem kleineren vorderen Segment bestehenden Abdomen sind fossile Vertreter aus dem Oberkarbon bekannt: † Poliochera Scudd. (Wales, Illinois) mit langem Cucullus und † Curculioides Buckl. († Geratarbus, † Kustarachne Scudd. e. p.) mit kurzem Cucullus, unsegmentiertem Abdomen (Wales, Illinois).

Im Oberkarbon Europas und Nordamerikas wurde eine große Anzahl von Spinnentieren gefunden, die in mancher Hinsicht den Phalangida nahestehen: Das Abdomen ist nicht vom Cephalothorax abgeschnürt, die Kiefertaster sind scherenlos, Schreitfüßen ähnlich ausgebildet. Mannigfache Abweichungen im Bau dieser mit festerem Chitinskelett versehenen Formen haben zur Aufstellung besonderer Gruppen geführt, welche von verschiedenen Autoren teils den Pedipalpen, den Araneiden, den Phalangiden zugezählt oder nahegestellt wurden, bald wurden sie als getrennte Ordnungen behandelt. Pocock unterscheidet diese Gruppen jetzt als drei besondere Ordnungen: † Haptopoda, † Phalangiotarbi, † Anthracomarti.

† Haptopoda Poc. Der unsegmentierte Cephalothorax stößt geradlinig an das schlanke Abdomen, dessen 10. Tergit hinten unten ein Analoperkulum trägt; Ventralseite mit neun Sterniten. Die schlanken Kieferfühler sind unvollständig bekannt; die Kiefertaster sind kurz, schlank, 6gliedrig. Die Tarsalia des ersten Schreitfußes sind zu 6gliedrigen Tastfäden umgestaltet (vgl. 4 Pedipalpi). Die großen Coxae der Füße sind durch eine weite

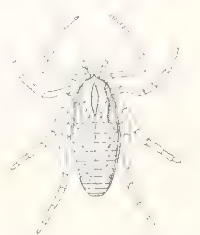


Fig. 11. † Plesiosiro Madeleyi Poc. Oberkarbon, Coseley b. Dudley; Wales. Oberseite. restauriert. $^4/_3$ natürlicher Größe. Nach Pocock.

Sternalarea getrennt, in der vorne ein kleiner dreieckiger Sklerit liegt. Die Lage der Genitalöffnung ist unbekannt. Die einzige Gattung † Plesiosiro Poc. wurde im Oberkarbon von Wales gefunden.

† Phalangiotarbi (Haase) Poc. Die hier zusammengefaßten Gattungen hatte Haase früher teils den amblypygen Pedipalpen, teils als Phalangiotarbi den Phalangiden zugerechnet. Die Gattungen † Phalangiotarbus Haase (Schottland), † Geraphrynus Scudd. (England, Nordamerika),

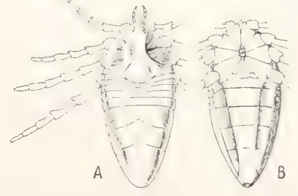


Fig. 12. † Geraphrynus angulatus Poc. Ober-Karbon; Coseley bei Dudley, Wales. A Oberseite, B Unterseite, restauriert. $^4/_3$ natürlicher Größe. Nach Pocock.

† Architarbus, † Geratarbus und † Opiliotarbus Scudd. (Nordamerika) sind dadurch ausgezeichnet, daß die ersten 6 bis 5 Segmente des Abdomens auffallend kurz, die 3 bis 4 hinteren wesentlich länger sind. Die Palpen sind kurz, fußartig. Die Coxae der Schreitfüße sind radial gestellt. Nahe dem mehr oder weniger vorgezogenen Vorderrande des Cephalothorax stehen 2 Medianaugen. Nebenaugen sind nicht nachgewiesen.

† Anthracomarti (Karsch, Haase, Pocock; Meridogastra Thor., A. Fritsch; Promygalidae A. Fritsch). Aus dem Oberkarbon von Böhmen, Schlesien, Sachsen, der Rheinpfalz, Frankreichs, Englands, Nordamerikas kennt man jetzt eine recht große Zahl von z. T. sehr großwüchsigen Spinnen, deren vier- bis gerundet drei- oder fünfseitiger Cephalothorax zwei vorne liegende Augen haben kann und durch eine hintere Querfurche die Lage des sechsten Segments deutlich zeigt. Kieferfühler sind unbekannt; die sechsgliedrigen Kiefertaster sind schlank beinförmig, die Schreitfüße



Fig. 13. † Anthracomartus Hindi Poc. Oberkarbon; Coseley bei Dudley, Wales. Oberseite. Wenig über natürliche Größe. Nach Pocock.

siebengliedrig. Die großen Coxae der 2. bis 6. Anhänge stehen um eine Sternalarea mit einem kleinen Sternalskleriten. Das meist breit gerundete große Abdomen zeigt auf der Oberseite hinter 1 bis 2, meist vom Cephalothorax bedeckten, supplementären 7 bis 8 Tergite, denen auf die Unterseite geschlagen 2 weitere folgen können; auf dem vorderen von diesen liegt das rundliche Analoperkulum. Auf der Unterseite liegen normal 6 Sternite, hinter deren erstem die Genitalöffnung liegt. Eigentümlich ist die Gliederung des Abdomens durch zwei meist grobe Längsrinnen in Rhachis und Pleuren; durch ein zweites dem Rande paralleles Rinnenpaar, das hinten zusammenfließen kann, werden oft die Pleuren noch geteilt. Jedes der Rinnenpaare kann unabhängig vom anderen auftreten. Die besonders deutliche Dreiteilung des Abdomens der † Anthracomarti (bei den † Haptopoda und † Phalangiotarbi ist sie viel schwächer) verführte Steinmann zu der unmöglichen Annahme, die † Anthracomarti seien aus den † Trilobiten entstanden. Unter den bekannten Trilobiten ist kein einziger Typ, der auch nur annähernd zu solcher Spekulation berechtigte.

Die sehr zahlreichen Gattungen faßt Pocock nach Material aus dem englischen Karbon in 4 Familien zusammen:

a) † Brachypygidae. Die Segmente des nur durch ein Paar Längsfurchen geteilten Abdomens sind an den Seitenrändern eingebuchtet. † Brachypyge H. Woodw., † Maiocercus Poc.

b) † Anthracomartidae. Cephalothorax mit nur einer hinteren Querfurche, die Pleuren der sehr breiten Abdominalsegmente sind durch eine dem Rande parallele Furche zweigeteilt, † Anthracomartus Karsch (= Promygale A. Fritsch.)

c) † Anthracosironidae. Das längliche Abdomen zeigt nur ein dem Rande mehr oder weniger paralleles Furchenpaar. † Anthracosiro Poc., † Trigonotarbus Poc.

d) † Eophrynidae. Cephalothorax mit tiefen Längs- und Querfurchen; Abdomen mit zwei oder nur einem Längsfurchenpaar; Oberfläche meist grob tuberkuliert. † Eophrynus H. Woodw., † Kreischeria Gein., † Aphantomartus Poc., † Hemikreischeria A. Fritsch, † Petrovicia, † Cyclotrogulus, † Stenotrogulus und zahlreiche andere von A. Fritsch wenig gut begründete Gattungen.

7. Acarida. Fossile Milben, mit einer Ausnahme noch lebenden Gattungen angehörend, sind seit dem Tertiär bekannt. Sie sind häufiger im Bernstein des

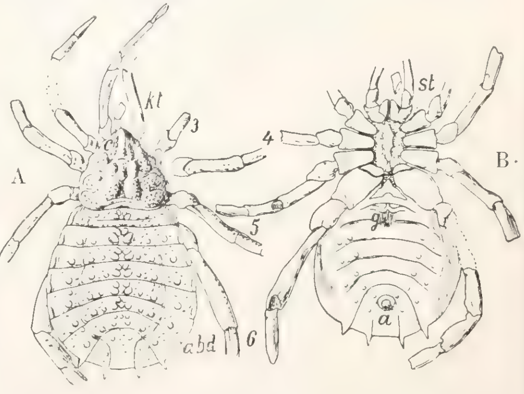


Fig. 14. † Eophrynus Prestwicii Buckl. sp. Oberkarbon; Coseley b. Dudley, Wales. A Ober-, B Unterseite. 3 bis 6 Schreitgröße, a Analoperkulum, abd Abdomen, c Cephalothorax, g Genitalöffnung, kt Kiefertaster, st Sternum. Natürliche Größe. Nach Pocock aus v. Stromer.

Unter-Oligocän gefunden worden, und zwar dort Vertreter fast aller jetzt unterschiedenen Hauptfamilien. In anderen Tertiärablagerungen wurden nur wenige Milben gefunden: ein Ixodes im Oligocän von Wyoming, Acarus im Miocän von Oeningen (Baden). Limnochares in der miocänen Braunkohle von Rott (Siebengebirge). Nur eine ausgestorbene Gattung ist bekannt: † Arytaena Menge, eine Trombidide mit verlängertem Kopfteil, vorspringenden Seitenecken und Beinen, die in Seiteneinschnitten des Körpers inserieren (Bernstein, Samland). Gallenbildungen an Blättern in der Braunkohle der Wetterau werden auf Milben zurückgeführt.

Literatur. *Bis 1885* **S. H. Scudder** *(Arachnoideen) in K. A. Zittel, Handb. d. Paläontologie I. Bd. II, S. 732, 1881 bis 1885.* — **F. A. Bather,** *The Holotypes of the Foss. Scorpions Palaeomachus anglicus and Palaeophonus caledonicus. Ann. a. Mag. Nat. Hist. Ser. VIII, Bd. 8, 1911.* — **C. E. Beecher,** *Note on the fossil Spider Arthrolycosa antiqua Harger. Am. Journ. Sci. Bd. 38, 1889.* — **A. Fritsch,** *Paläozoische Arachniden, 1904.* — **L. Gill,** *A carboniferous Arachnid from Lankashire. Geol. Mag., Dec. V, Bd. 8, 1911.* — **E. Haase,** *Beiträge zur Kenntnis der fossilen Arachnoiden. Zeitschr. der Deutsch. Geol. Ges., Bd. 42, 1890.* — **R. J. Pocock,** *1. The Scottish Silurian Scorpion. Quart. Journ. Micr. Sci., Bd. 44, 1901; 2. Notes on the Morphology and generic Nomenclature of some Carboniferous Arachnida. Geol. Mag., Dec. V, Bd. 7, 1910; 3. A Monograph of the terrestrial Arachnida of Great Britain. Pal. Soc. 1910 (1911).* — **S. H. Scudder,** *Canadian fossil Insects, Myriapods and Arachnids. Contrib. to Canad. Palaeont. Bd. 2, I, 1895.* — **A. Thevenin,** *Sur la découverte d'Arachnides dans le Terr. houill. de Commentry. Bull. Soc. géol. France, S. 4, Bd. 1, 1902.* — **H. Woodward,** *Further notes on the Arthropoda of the British Coalmeasures. Geol. Mag., Dec. V, Bd. 4, 1907.*

J. F. Pompecki.

Arago
Dominique François.

Geboren am 26. Februar 1786 in Estagel bei Perpignan; gestorben am 2. Oktober 1853 in Paris. Er trat 1804 in die polytechnische Schule ein und wurde 1805 Sekretär am Bureau des Longitudes. Im Verein mit Biot und den Spaniern Chaix und Rodiguez setzt Arago die zwischen Barcelona und Dünkirchen begonnenen Gradmessungen fort bis zur Insel Formentera. Während des spanischen Aufstandes gegen Napoleon wurde er von den Spaniern verhaftet und auf der Zitadelle Belver bei Palma gefangen gehalten, ergriff die Flucht auf einem nach Algier fahrenden Schiff, geriet auf der Reise von da nach Marseille durch Schiffbruch in die Hände der Barbaresken und erlangte erst 1809 seine Freiheit wieder. 1830 ernannte Napoleon ihn zum Direktor der Sternwarte in Paris; 1831 wurde er in die Deputiertenkammer gewählt, wo er sich der äußersten Linken anschloß, 1848 zum Mitglied der provisorischen Regierung ernannt und mit den Ministerien des Kriegs, der Marine und des Innern betraut. Als die Regierung ihre Gewalt niederlegte, ernannte man ihn zum Mitglied der Exekutionskommission, in welcher Stellung er sich gegen die demagogischen Umtriebe wendete und während des Juniaufstandes seinen Mut glänzend bewährte. Danach war Arago in der Nationalversammlung als Mitglied der Kriegskommission tätig. Seine Stelle als Direktor der Sternwarte behielt er nach dem Staatsstreich vom 2. Dezember 1851 bei, da die Regierung ihm den Amtseid erließ. Aragos Arbeiten bewegen sich auf den Gebieten der Theorie des Lichts, der Polarisation, des Galvanismus und Magnetismus. Die Resultate seiner im Verein mit Biot angestellten Untersuchungen gab er mit diesem gemeinsam heraus. Seine Veröffentlichungen zeichnen sich durch leichtfaßliche Darstellung auch der verwickeltsten Probleme aus.

Literatur. **F. Arago,** *L'histoire de ma jeunesse. Mit Ergänzungen anderer Autoren, Brüssel und Leipzig 1854.* — **Lunel,** *Biographie de F. Arago, Paris 1853.* — **Barral,** *F. Arago, Paris 1853.* — **Audigaune,** *François Arago son génie, et son influence, 2. Aufl. 1867.* — **Rosenberger** *Gesch. d. Physik III S. 152—153, Braunschweig 1887 bis 1890.*

E. Drude.

Arbeit.

1. Begriff und Definition der Arbeit.

Im täglichen Leben braucht man das Wort „Arbeit" zur Bezeichnung verschiedenartiger körperlicher und geistiger Tätigkeiten, wobei im allgemeinen auf eine ziffermäßige Angabe der Arbeit verzichtet wird.

Die Physik schließt sich an den Sprachgebrauch an, gibt aber durch Analyse der Vorgänge, die das tägliche Leben als Arbeitsleistungen bezeichnet, dem Worte „Arbeit" eine exakte physikalische Definition. Sie macht sich zunächst klar, daß eine solche Arbeitsleistung, z. B. das Heben einer Last, stets das Vorhandensein einer Kraft verlangt, für die wir in unserem Muskelgefühl einen direkten Maßstab haben. Zahlenmäßig läßt sich jede Kraft durch Vergleich mit dem Kilogrammgewicht angeben, d. h. derjenigen Kraft, mit der die kg-Masse infolge der Schwere auf ihre Unterlage drückt. Das Vorhandensein der Kraft allein genügt aber nicht, um die Arbeitsleistung zu charakterisieren. Die Kraft muß sich auch betätigen, d. h. sie muß ihren Angriffspunkt verschieben. Wir empfinden bei genauer Beobachtung, daß wir um so mehr Arbeit leisten müssen, je größer die Kraft ist, die wir dazu nötig haben, und je größer die Verschiebung des Angriffspunktes bezogen auf die Kraftrichtung ist. So kommt man zu der Definition: Arbeit (Betätigung einer Kraft) ist zu messen durch das Pro-

dukt aus Kraft und Wegstrecke ihrer Betätigung. Z. B. ist die Arbeit, die beim Heben einer Last geleistet wird, gemessen durch das Produkt Gewicht der Last mal Hubhöhe.

An diesem Beispiel zeigt sich übrigens wieder, wie leicht man in die Irre gehen kann, wenn man das unbefangene Gefühl kritiklos zur Definition exakter physikalischer Begriffe heranzieht. Wenn nämlich jemand ein Kilogrammgewicht fünf Minuten bei wagerecht ausgestrecktem Arm in der Hand hält, so hat er dabei die entschiedene Empfindung einer erheblichen Arbeitsleistung. Daß es sich hier nur um eine physiologische Arbeitsleistung handelt, diebeim Gespannthalten der betreffenden Muskeln verbraucht wird, während an dem Gewichte keine Arbeit geleistet wird, macht dem primitiven Denken gewisse Schwierigkeiten.

Der Erste, der die Bedeutung des Produktes Kraft mal Weg bei Massenbewegungen erkannte, war Galilei.

Die eigentliche Einführung des Wortes Arbeit in die Mechanik erfolgte viel später, sie stammt von Coriolis.

Den gewonnenen Arbeitsbegriff wenden wir auf die verschiedenen Kräfte der unbelebten Natur an. Die Arbeitseinheit ist durch die gebräuchlichen Einheiten der Kraft und des Weges festgelegt: man benutzt das cmkg oder das mkg neben anderen Einheiten über die weiter unten zu sprechen sein wird. Solange die Kräfte, um deren Betätigung es sich handelt, an greifbarer Materie haften, sprechen wir von „mechanischer Arbeit". Ihr gegenüber steht die elektrische und magnetische Arbeit von Kräften, für die man nicht die greifbare Materie unmittelbar verantwortlich macht.

Mechanische Arbeit wird „geleistet" beim Heben eines Gewichtes (Gewicht mal Hub); beim Verschieben eines Gegenstandes auf einer rauhen Ebene ist das Produkt Reibungswiderstand mal Wegstrecke gleich der Reibungsarbeit usw. Sie wird allgemein geleistet von dem arbeitenden Körper „auf den von dem Arbeitsprozeß ergriffenen Körper". H. A. Lorentz drückt dies Verhältnis aus mit den Worten, „der erstere Körper tut Arbeit auf den letzteren". Die Kraft, die sich dabei betätigt, können wir als die Quelle der Arbeit bezeichnen. In diesem Sinne sollen unten die verschiedenen Quellen der Arbeit betrachtet werden.

Mit der Ausdrucksweise von H. A. Lorentz wird die Einführung eines zweiten Begriffes anschaulich gemacht, der in den Naturwissenschaften ein herrschender geworden ist: der Energie. Die Naturbeobachtung ergibt, daß jedem Körper oder Körpersystem, welches für sich betrachtet wird, ein fester Betrag von Arbeitsfähigkeit anhaftet, die man Energie des Systems oder des Körpers nennt. Läßt man das System oder den Körper auf einen anderen Körper einwirken, so tritt das ein, wovon wir oben sprachen; die beiden Körper treten zueinander in „Arbeitsbeziehung", der erste Körper „tut Arbeit" auf den zweiten (oder umgekehrt).

Die Beobachtung lehrt nun, daß bei diesem Prozeß die Energie des ersten Körpers um das Maß der „getanen Arbeit" abnimmt, die Energie des zweiten Körpers um dasselbe Maß zunimmt (oder umgekehrt). Arbeit und Energie sind einander äquivalent. Nach diesen Festsetzungen gehen wir dazu über, die Kräfte als Quellen der verschiedenen physikalischen Arbeitsformen und diese selbst zu betrachten.

2. Kräfte als Quellen der Arbeit. Wir unterscheiden folgende Kräfte: Kräfte der Ruhe, Kräfte der Bewegung, und zwar der sichtbaren und unsichtbaren Bewegung (Wärme), Spannungskräfte, Magnetische und elektrische Kräfte usw.

2a) Kräfte der Bewegung. Sie treten als Arbeitsquellen in Tätigkeit, wenn man Massen zwingt, ihren Bewegungszustand zu ändern. Die Massen haben durch ihre Geschwindigkeit die Fähigkeit, Arbeit zu leisten, sie haben „kinetische Energie". Hierher gehören nicht nur die sichtbaren Bewegungen der Körper, sondern auch die Bewegungen der kleinsten Teile der Materie und des Aethers.

α) Sichtbare Bewegung. Die einem Körper infolge seiner sichtbaren Bewegung innewohnende Arbeitsfähigkeit bezeichnet man als kinetische Energie oder auch als lebendige Kraft oder Wucht. Man gewinnt für sie einen zahlenmäßigen Ausdruck in der Formel:

$$L = \frac{1}{2} m v^2,$$

wo m die Masse, v die Geschwindigkeit bedeutet.

Rotierende Körper, Wind, fließendes Wasser usw. sind Beispiele. Ihre Energie kann zur Leistung von Arbeit benutzt werden. Durch die Arbeitsleistung vermindert sich die Bewegungsgeschwindigkeit der Körper, die Bewegung verlangsamt sich, die kinetische Energie nimmt um den Betrag der geleisteten Arbeit ab. Kommt der Körper zur Ruhe, so ist seine Arbeitsfähigkeit verbraucht. Die kinetische Energie des Ruhezustandes ist Null.

β) Unsichtbare Bewegung (Wärme). Den Molekülen der Körper schreiben wir nach der kinetischen Theorie der Materie (siehe diese) eine regellose Bewegung zu, deren Arbeitsfähigkeit die Wärmeenergie darstellt. In formelmäßiger Schreibweise kann man für die Wärmeenergie W setzen:

$$W = c\, m\, (v^2)$$

wo c eine Körperkonstante, die spez. Wärme, m die Körpermasse und (v^2) den Mittelwert der Quadrate der Geschwindigkeiten der

Moleküle bedeutet. Da man die Wärme eines Körpers noch auf andere Weise bestimmen kann, gibt diese Formel die Möglichkeit, die mittlere molekulare Geschwindigkeit, z. B. eines Gases zu bestimmen.

Wird auf Kosten der Wärmeenergie eines Körpers Arbeit geleistet, so verlangsamt sich die Bewegung der Moleküle, der Körper kühlt sich ab.

Die Wärmeenergie eines Körpers ist selbstverständlich wie jede andere Energie eine endliche Größe, indessen ist es bis jetzt noch nicht gelungen, einem Körper seine ganze Wärmeenergie zu nehmen.

Die Messung der Wärme auf Grund ihrer energetischen Definition ist im allgemeinen unmöglich, weil uns die Messung der Molekulargeschwindigkeit unmöglich ist. Man bestimmt deshalb die Wärme durch die Messung von Menge m und Temperatur t eines Körpers. Nachdem man durch Vergleich der Wärmeeigenschaften des Körpers mit denen des Wassers seine spez. Wärme c bestimmt hat (vgl. den Artikel „Kalorimetrie") findet man

$$w = mct$$

in g-Kalorien, wenn m in g ausgedrückt ist. Wie schon oben bemerkt, kann man niemals die ganze Wärmeenergie eines Körpers bestimmen, sondern nur Energieunterschiede gegenüber einem Anfangszustand, dementsprechend ist t stets eine Temperaturdifferenz.

Der Zusammenhang der Wärmeenergie im kalorischen Maß mit der Energie im technischen oder C.G.S. Maßsystem wird experimentell gefunden. Indem man im Versuch mechanische Arbeit (durch Reibung) in Wärme umsetzt, findet man, daß

$$1 \text{ kg-Kalorie} = 426 \text{ mkg}$$

ist. Man nennt diese Zahl oder ihren reziproken Wert das mechanische Wärmeäquivalent.

γ) Bewegung von Elektrizität. Nicht nur die greifbare Materie, sondern auch die Elektronen, die Teilchen negativer Elektrizität, aus denen z. B. die Kathodenstrahlen bestehen, haben Arbeitsfähigkeit dadurch, daß sie Geschwindigkeit besitzen. Die letztere berechnet sich, wie unter α) ausgeführt, zu

$$\tfrac{1}{2}\mu v^2$$

wenn μ die Masse des Elektrons ist. Hier setzt sich die Masse μ aus zwei Teilen zusammen, der mechanischen und der elektromagnetischen. Wie groß die beiden Anteile sind, ist gegenwärtig noch Gegenstand der Forschung; es ist Grund zu der Annahme vorhanden, daß die mechanische Masse der Elektronen Null ist, die kinetische Energie derselben wäre dann eine rein elektromagnetische Eigenschaft (siehe auch den Artikel „Elektron").

Neben den Teilchen negativer Elektrizität, den Elektronen, hat man in den Kanalstrahlen Teilchen positiver Elektrizität entdeckt, die viel geringere Geschwindigkeiten erreichen, als die Elektronen. Ihre Energie ist gleichfalls kinetische, ihre Masse setzt sich gleichfalls aus einem mechanischen und einem elektromagnetischen Teil zusammen.

2b) Kräfte der Ruhe. Wenn zwei Körper zueinander in einer physikalischen Beziehung stehen, die sich durch eine Kraftwirkung zwischen den beiden Körpern äußert, muß die Anwesenheit des einen Körpers in der Nähe des anderen Körpers ihm Arbeitsfähigkeit erteilen und umgekehrt. Hier sind also „Kräfte der Ruhe" die Quellen der Arbeitsfähigkeit. Man bezeichnet diese Art der Arbeitsfähigkeit auch als potentielle Energie, latente Energie oder Energie der Lage. Auf die Entstehungsursache für die Kräfte kommt es hier nicht an.

Unter den Kräften der Ruhe sind besonders die zentralen Kräfte wichtig. Ziehen sich z. B. die Körper gegenseitig an, so ist das Arbeitsvermögen des Systems um so größer, je weiter die Körper voneinander entfernt sind. Das Arbeitsvermögen nimmt ab, wenn sich die Körper (unter Arbeitsleistung) einander nähern. Umgekehrt liegt die Sache, wenn zwei Körper sich voneinander zu entfernen streben. Dann ist der Energievorrat um so größer, je näher die Körper einander sind.

α) Gravitationskräfte. Das für uns wichtigste hierher gehörige Beispiel ist ein System von Massen, welche sich nach dem allgemeinen Gravitationsgesetz anziehen. Wir wissen, daß die Anziehungskraft P zwischen zwei Massen m_1 und m_2 in der Entfernung r gleich ist:

$$P = k\,\frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Denkt man sich jetzt die Masse m_1 festgehalten, und m_2 um die kleine Strecke dr von m_1 entfernt, so muß hierzu offenbar eine Arbeit

$$dA = Pdr = \frac{km_1 m_2}{r^2}.dr$$

geleistet werden. Diese Arbeit findet sich als potentielle Energie des Systems m_1 m_2 wieder. Wird m_2 um die Strecke $r—r_1$ $(r > r_1)$ verschoben, so findet man die ganze, hierdurch bedingte Aenderung der potentiellen Energie

$$A = km_1 . m_2 . \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r}\right)$$

Betrachten wir jetzt unter m_1 die Sonnenmasse und unter r_1 den Sonnenradius, so findet sich die Energie des aus Sonne und Planet m_2 (in der Entfernung r) bestehenden Systems:

$$A = \frac{km_1 . m_2}{r_1} - \frac{km_1 . m_2}{r}$$

Hier bedeutet

$$\frac{km_1 . m_2}{r_1} = A_0$$

denjenigen Betrag an potentieller Energie, den die beiden Körper in sehr großem Abstand ($r = \infty$) voneinander befindlich besitzen.

Am unmittelbarsten tritt uns die Gravitationsenergie in der Nähe der Erdoberfläche entgegen. Ein Körper von der Masse m besitzt ein um so größeres Arbeitsvermögen, je höher er über der Erdoberfläche liegt. Gestattet man ihm, sich der Erdoberfläche zu nähern, so geht die dem System Erde-Körper innewohnende potentielle Energie über in kinetische Energie des Körpers m.

Hierfür gilt die Gleichung:

$$mgh = \frac{1}{2} m v^2$$

wo h die durchlaufene Höhe über der Erdoberfläche und v die nach Durcheilen der Höhe h erreichte Geschwindigkeit des Körpers bedeutet. Streng genommen nimmt auch die Erde bei dem Vorgang kinetische Energie an, was jedoch der Kleinheit des Betrages halber vernachlässigt wird.

β) Elektrische Kräfte (vgl. die Artikel „Elektrische Felder“ und „Elektrische Influenz“). Coulomb ermittelte ein Gesetz, nach welchem sich gleichnamige elektrische Ladungen abstoßen, ungleichnamige sich anziehen. Sind die beiden gleichnamigen elektrischen Mengen e_1 und e_2 in einem Gebiet der Dielektrizitätskonstante k, so wird die abstoßende Kraft in der Entfernung r:

$$P = \frac{e_1 \cdot e_2}{k\, r^2}$$

Dieser Kraft entsprechend besitzen elektrisch geladene Körper elektrostatische Energie, welche der Energie der Gravitation ganz analog ist.

Zwei Elektrizitätsmengen e_1, e_2 befinden sich im Abstande r_1 voneinander. Wir berechnen die Energieänderung A des Systems, die dadurch entsteht, daß wir unter Ueberwindung der abstoßenden Kraft

$$\frac{e_1\, e_2}{\varepsilon\, r^2}$$

e_2 aus der Entfernung r_1 in die Entfernung r_2 zu e_1 bringen:

$$A = \frac{1}{\varepsilon} \int_{r_1}^{r_2} \frac{e_1 \cdot e_2}{r^2}\, dr = \frac{e_1\, e_2}{\varepsilon} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

Setzt man $r_1 = r$ und $r_2 = \infty$, so erhält man als potentielle Energie zweier elektrischer Mengen e_1 und e_2 im Abstand r

$$A = \frac{e_1\, e_2}{\varepsilon\, r}$$

Setzen wir $e_2 = 1$, so wird

$$A = \frac{e_1}{\varepsilon r} = V$$

und wir nennen V das Potential von e_1. Man kann also sagen: Hat man ein System elektrischer Mengen, welches auf einen gegebenen Punkt das Potential V hat, so wird die elektrostatische Energie des Systems um Ve_2 vermehrt, wenn man e_2 an jenen Punkt bringt.

Liegt ein Leiter der Kapazität C und der Ladung e vor, so ist sein Potential

$$V = \frac{e}{C} \text{ (Siehe „Kapazität“)}$$

Bringt man nun die kleine Elektrizitätsmenge de auf den Leiter, so verlangt dies die Arbeitsleistung

$$d\,A = \frac{e\,de}{C}$$

oder wenn e auf E vergrößert wird,

$$A = \int_e^E \frac{e . de}{C} = \frac{E^2 - e^2}{2\,C}$$

War e anfänglich = Null, so wird

$$A = \frac{E^2}{2C}$$

und mit $\frac{E}{C} = V$ haben wir: $A = \frac{EV}{2} = \frac{1}{2} CV^2$

Dies ist die Arbeit, die zur Ladung eines Leiters auf das Potential V oder die Ladung E aufgewendet werden muß und die dann als elektrostatische Energie auf ihm aufgepeichert ist.

γ) Magnetische Kräfte (vgl. die Artikel „Magnete“ und „Magnetische Influenz“). Ebenfalls von Coulomb stammt das Gesetz, welches die zwischen zwei magnetischen Mengen m_1 und m_2 im homogenen Medium der Permeabilität μ in der Entfernung r stattfindende Kraftwirkung K beschreibt.

$$P = \frac{m_1\ m_2}{\mu\ r^2}$$

Hiernach wird die potentielle Energie der beiden magnetischen Mengen

$$A = \frac{m_1\ m_2}{\mu . r}$$

Die durch diese Formeln begründete Analogie zur Elektrostatik ist nur eine teilweise Es ist nicht möglich, die Energie einer einzelnen magnetischen Menge m zu bestimmen, weil eine solche nicht zu verwirklichen ist. Man kann allerdings die Energie von Systemen natürlicher und künstlicher Magnete bestimmen, was indessen hier zu weit führen würde. Wichtiger erscheint eine kurze Betrachtung der magnetischen Arbeit, die auf einen Körper übertragen werden muß, um ihn aus dem unmagnetischen Zustand in den magnetischen zu

bringen. Der Körper werde einer magnetischen Kraft $\mathfrak{H}$ ausgesetzt und erhalte unter ihrer Wirkung pro Volumeinheit das magnetische Moment $\mathfrak{J}$; es gilt dann die Beziehung

$$\mathfrak{J} = \mathfrak{H}\varkappa$$

Wir stellen uns eine magnetische Volumeinheit als kleinen Magneten mit dem Momente

$$\mathfrak{J} = m.1$$

vor, wo m die Magnetismusmenge der Endflächen, 1 die Länge des Magneten bedeutet. Wird jetzt die induzierende magnetische Kraft um $d\mathfrak{H}$ gesteigert, so wachse das magnetische Moment der Volumeinheit um

$$d\mathfrak{J} = dm.1$$

Der Vorgang kommt darauf hinaus, daß durch die induzierende Kraft die weiteren magnetischen Mengen $\pm$ dm um die Strecke 1 voneinander entfernt werden. Hierzu muß eine Arbeit geleistet werden, die sich berechnet als das Produkt von Kraft und Weg. Die auf die Menge dm im Mittel ausgeübte Kraft ist

$$P = dm\,(\mathfrak{H} + \tfrac{1}{2}\,d\mathfrak{H})$$

der Weg ist 1, die Arbeit also

$$dA = dm\,(\mathfrak{H} + \tfrac{1}{2}\,d\mathfrak{H})$$

Da $dm = d\mathfrak{J}$ und $d\mathfrak{J} = \varkappa d\mathfrak{H}$, so kommt

$$dA = \varkappa\, d\mathfrak{H}\,(\mathfrak{H} + \tfrac{1}{2}\,d\mathfrak{H})$$

Integriert man, nachdem man $\frac{1}{2}\varkappa\, d\mathfrak{H}^2$ gegen $\varkappa\mathfrak{H}.d\mathfrak{H}$ vernachlässigt hat, so folgt: Die Magnetisierungsarbeit, welche nötig ist, um einen Körper der Suszeptibilität $\varkappa$ vom unmagnetischen Zustand bis zum magnetischen Moment $\mathfrak{J}$ der Volumeinheit zu magnetisieren, ist

$$A = \frac{\mathfrak{J}^2}{2\varkappa} = \frac{\varkappa\mathfrak{H}^2}{2}$$

δ) Elastische Kräfte (vgl. den Artikel „Elastizität"). Die Arbeitsfähigkeit, die wir an elastisch gespannten Körpern beobachten, erfordert die Annahme von Kräften, welche die kleinsten Teilchen in molekularem Abstand aufeinander ausüben. Die Natur dieser Kräfte hat sich bisher der Erforschung verschlossen. Nichtsdestoweniger kann in bestimmten Fällen die Arbeitsfähigkeit eines Körpers, soweit sie von den Molekularkräften zwischen seinen kleinsten Teilen herrührt, bestimmt werden.

Dies ist in einfacher Weise möglich bei elastischen Körpern, die einer Deformation unterworfen werden. Das einfachste Beispiel bietet ein Stab dar, der einer longitudinalen Zugkraft P unterworfen wird. Ist sein Querschnitt q, seine Länge L, sein Elastizitätsmodul E, so wird seine Verlängerung λ unter dem Einfluß von P

$$\lambda = \frac{PL}{qE}$$

Die Spannkraft P leistet dabei die Arbeit

$$A = \tfrac{1}{2}\,P\,\lambda$$

die sich als Spannungsenergie des Stabes wiederfindet. Setzt man

$$\frac{P}{q} = p$$

d. h. gleich der Spannung pro Einheit des Stabsquerschnittes, und

$$q.L = V$$

d. h. gleich dem Stabvolumen, so wird

$$A = \tfrac{1}{2}\,p^2\,\frac{V}{E}$$

Hieraus findet man die Spannungsenergie der Volumeinheit

$$A = \tfrac{1}{2}\,\frac{p^2}{E}$$

Ganz allgemein wird der Energieinhalt A eines Volumelementes dx.dy.dz, Figur 1, an dessen Seiten die Spannungen p_x, p_y, p_z angreifen, wenn k das Verhältnis der Längs-

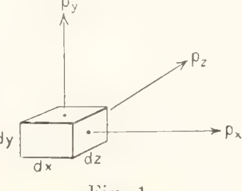


Fig. 1.

dilatation zur Querkontraktion des betreffenden Materiales bedeutet:

$$A = \left\{ \frac{\lambda}{2E}\,(p_x^2 + p_y^2 + p_z^2) - \frac{k}{E}\,(p_x\,p_y + p_y\,p_z + p_z\,p_x) \right\} dx.dy.dz$$

Auf den Beweis dieser Formel muß hier verzichtet werden.

ε) Die Oberflächenspannung (vgl. den Artikel „Molekularkräfte"). Im vorigen Abschnitt haben wir gesehen, wie die Volumänderung fester Körper Arbeit verbraucht, und wie man daher durch Volumänderung in den Volumelementen Energie ansammeln kann.

Die Eigenschaft der Volumenergie besitzen auch flüssige Körper. Bei ihnen tritt jedoch noch eine zweite Form der Energie auf, die ihren Sitz in den Oberflächenelementen hat. In der Figur 2 sei z. B. eine Lamelle aus Seifenlösung in den Rahmen ABC gebracht; nach unten werde die Lamelle durch die bewegliche Rahmenseite D begrenzt. Hängt man an D ein Gewicht K, so wird D um die Strecke a nach unten bewegt, bis

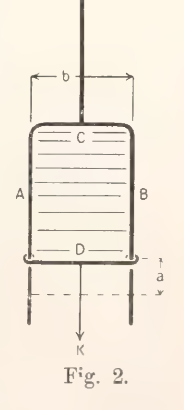


Fig. 2.

wieder Gleichgewicht eingetreten ist. Die geleistete Arbeit a. K, die zur Bildung der Oberfläche diente, hat sich als potentielle Energie in der Lamelle aufgespeichert. Um diese Oberflächenenergie zu erklären, müssen wir annehmen, daß in der Oberfläche Tangentialspannungen T, bezogen auf die Längseinheit eines Querschnittes, herrschen; da die Lamelle von zwei Oberflächen begrenzt wird, gilt die Gleichung:

$$2\,T\,.\,b\,.\,a = Ka.$$

Es ist 2 Tba die Zunahme der Oberflächenenergie der Lamelle.

ζ) Chemische Kräfte. Ein System von zwei Körpern, die sich chemisch ver einigen, besitzt häufig Arbeitsfähigkeit. So entwickeln viele chemische Prozesse große Wärmemengen, während allerdings andere nur durch Zufuhr von Wärmeenergie eingeleitet werden können. Diese Arbeitsfähigkeit chemischer Systeme beruht auf den Kräften, welche zwischen den Atomen und Molekülen wirksam sind. Die chemischen Arbeitsprozesse ordnen sich also denjenigen unter, die Kräfte der Ruhe als ihre Quelle in Anspruch nehmen. Es ist bemerkenswert, daß die beiden zu vereinigenden Körper nicht verschieden zu sein brauchen, z. B. besitzt ein Wasserstoffmolekül H_2 eine andere potentielle Energie als zwei getrennte Wasserstoffatome H. Man bezeichnet die bei einer bestimmten chemischen Reaktion eintretende Energieänderung, wenn Druck und Temperatur zu Anfang und Ende der Reaktion die gleichen sind, die Wärmetönung der Reaktion.

3. Einige Anwendungen des Arbeitsbegriffes. 3a) In der Mechanik starrer Körper. Seine größte Bedeutung hat der Arbeitsbegriff in der Mechanik erlangt. Die Beziehungen zwischen Kraft, Weg und Arbeit treten hier unter Benutzung der mathematischen Formelsprache am vielseitigsten zutage.

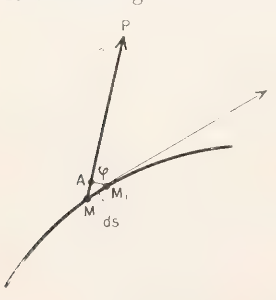


Fig. 3.

α) Allgemeine Festsetzungen. Das Produkt $P\,ds\cos\varphi$ einer Kraft P in die Projektion $ds\cos\varphi$ (Fig. 3) des vom Angriffspunkt zurückgelegten Wegelementes auf die Kraft heißt: Elementararbeit.

Zerlegt man die Kraft P in eine Normalkomponente P_n senkrecht zur Bahn des Punktes M und in eine Tangentialkomponente P_t, so wird

$$P_t = P\cos\varphi$$

und die Elementararbeit gleich dem Produkt der Tangentialkomponente in das Wegeelement.

Kräfte, die an einem Punkt angreifen, werden nach dem Parallelogrammgesetz zu einer Resultierenden vereinigt. Die Resultierende R wird nach Richtung und Größe durch die Schlußlinie MP_4 des Kräftepolygons (Fig. 4) dargestellt, wenn die Polygonseiten nach Richtung und Größe die zusammenzusetzenden Kräfte darstellen. Das gilt auch im Raum.

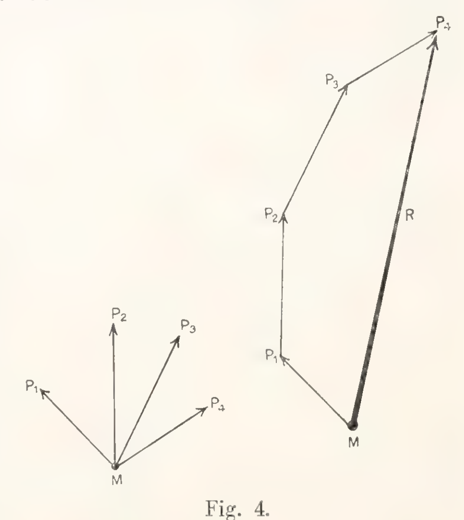


Fig. 4.

Analog den Kräften werden ihre Elementararbeiten summiert.

Handelt es sich um die Summierung von Elementararbeiten einer Kraft, deren Angriffspunkt nacheinander verschiedene Wegelemente durchläuft, so wird ebenfalls der Polygonsatz angewendet, da sich auch die Wegelemente nach ihm summieren. Der Polygonsatz für die Summierung der Elementararbeiten einer Kraft P längs eines Weges $M_1\,M_2$ (Fig. 5) lautet in Integralgestalt

Fig 5.

$$A = \int_{S_1}^{S_2} P\cos\varphi\,ds$$

Graphisch wird diese Formel durch Figur 6 interpretiert.

β) Prinzip der virtuellen Arbeit. Die erste Anwendung des Arbeitsbegriffes zur Bestimmung von Gleichgewichtspro-

blemen verdankt man Galilei. Er erkannte, daß ein System paralleler Kräfte P (z. B. Schwerkräfte) sich dann im Gleichgewicht befindet, wenn die Summe aller Produkte Ph verschwindet, wo die h die Wege der Angriffspunkte bedeuten, die zurückgelegt werden, wenn das im Gleichgewicht befindliche System verschwindend wenig aus dem Gleichgewicht heraus verschoben wird.

Hiermit wird zum erstenmal ein ganz allgemein-gültiges Prinzip angewendet, das Prinzip der virtuellen Arbeiten. Unter virtueller Arbeit versteht man die Elementar-

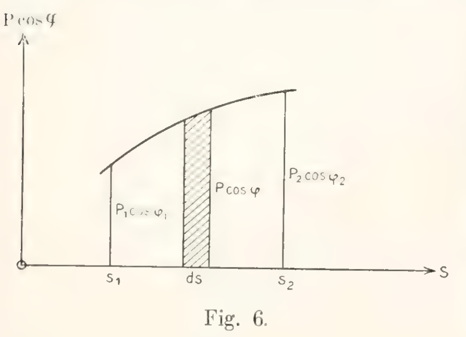


Fig. 6.

arbeit, die jede der angreifenden Kräfte bei einer verschwindend kleinen Verschiebung ihres Angriffspunktes leistet oder verbraucht Das Prinzip der virtuellen Arbeiten sagt aus: Ein System von Kräften ist im Gleichgewicht, wenn die Summe aller virtuellen Arbeiten = 0 ist. Die allgemeine analytische Formulierung des Prinzips der virtuellen Arbeit gibt die Formel:

$$\delta A = \Sigma(X_n \delta x + Y_n \delta y + Z_n \delta z) = 0$$

wo die X Y Z die Komponenten der am Punkte

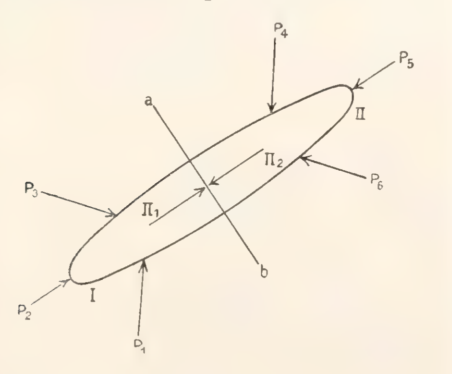


Fig. 7.

x y z angreifenden Gesamtkraft bedeuten. Die δx, δy, δz sind die Komponenten der virtuellen Verschiebungen. Die Summe erstreckt sich über sämtliche Kraftangriffs punkte des Systems. Auf eine tiefere Diskussion des Prinzips und seiner strengen Formulierung kann hier nicht eingegangen werden (vgl. auch die Artikel „Gleichgewicht" und „Physikalische Prinzipien").

3b) In der Mechanik deformierbarer Körper. α) Feste Körper. Hier handelt es sich wesentlich um feste deformierbare Körper.

Zunächst bedarf es der Definition der inneren und äußeren Kräfte.

Befindet sich ein materielles System (Fig. 7) unter Einfluß der Kräfte $P_1 \ldots\ldots P_6$ im Gleichgewicht, und denkt man sich dasselbe durch einen Schnitt a—b in zwei Teile I und II zerlegt, und z. B. den Teil II entfernt, so muß offenbar, wenn das Gleichgewicht des Teiles I erhalten bleiben soll, an der Schnittstelle ein Kräftesystem Π_2 angebracht werden, welches der Wirkung des Teiles II auf I äquivalent ist. Dann hält das System der äußeren Kräfte $P_1 P_2 P_3$ dem System der inneren Kräfte Π_2 das Gleichgewicht.

Die Mechanik der deformierbaren Körper bildet nun die Begriffe der Arbeit der inneren und äußeren Kräfte. Bei der Betrachtung des Gleichgewichtes starrer Körper kommt offenbar Arbeit nicht in Frage. Lediglich bei der Gleichgewichtsbetrachtung deformierbarer Körper muß die Arbeit in Rücksicht gezogen werden, da sowohl die inneren wie die äußeren Kräfte infolge der Deformation, resp. der Verschiebung ihrer Angriffspunkte Arbeit leisten. Die Begriffe Formänderungsarbeit, Deformationsarbeit, Verschiebungsarbeit sind synonym.

Fig. 8.

Wir erörtern die oben eingeführten Begriffe an einem einfachen Beispiel. Ein gewichtlos gedachter elastischer, an seinem Ende A befestigter Stab (Fig. 8) AB (Elastizitätsmodul E) werde zur Zeit t = o an seinem Ende B von der konstanten Kraft P erfaßt. Es beginnt jetzt eine Deformation des Stabes in Richtung seiner Achse, die beendigt ist, sobald die durch die Deformation im Innern des Stabes wachgerufenen Kräfte S der äußeren Kraft P gleich werden. Zur Zeit t = o war ja der Stab spannungslos, also S = o. Ist Gleichgewicht eingetreten, so hat sich der Stab um das Maß λ ver-

längert, für welches unter den Voraussetzungen der Elastizitätstheorie gefunden wird

$$\lambda = \frac{L.S}{E.F} = \frac{L.P}{E.F}$$

Man nimmt nun an, daß diese Gleichung dauernd während des ganzen Formänderungsvorgangs gültig sei und bildet die Formänderungsarbeit der inneren Spannung S

$$A = \int_0^P S\,d\lambda$$

woraus mit

$$d\lambda = \frac{L.d\,S}{E\,F}$$

folgt:

$$A = \frac{L\,S^2}{E\,F} = \frac{P\,\lambda}{2}$$

Dies ist die Verschiebungsarbeit der inneren Kräfte.

Betrachtet man jetzt die Verschiebungsarbeit der konstanten äußeren Kraft P, so hat ihr Angriffspunkt den Weg λ zurückgelegt und ihre Verschiebungsarbeit ist also

$$\mathfrak{A} = P.\lambda = 2\,A$$

Es ist also die Arbeit der konstant gedachten äußeren Kräfte gleich dem doppelten der Verschiebungsarbeit der inneren Kräfte.

Dieser Satz ist in der Mechanik deformierbarer Körper unter der Bezeichnung Clapeyronsches Theorem bekannt. Er gilt unter den Voraussetzungen der Elastizitätslehre für isotrope Körper unter Einwirkung beliebiger äußerer Kräfte.

Für die Verschiebungsarbeit des Clapeyronschen Theorems hat Castigliano in der Theorie der Fachwerke eine Anwendung von weittragender Bedeutung geschaffen. Stellt man die Verschiebungsarbeit A für ein Fachwerk auf, so wird A Funktion der sämtlichen unbekannten inneren Stabkräfte und der unbekannten Stützwiderstände X Y... sein. Castigliano bewies, daß bei gegebenen äußeren Kräften sich die oben angeführten Unbekannten stets so einstellen, daß die Verschiebungsarbeit des Fachwerks ein Minimum wird. Man kann also die Unbekannten, sobald die Verschiebungsarbeit A berechnet ist, aus einem Gleichungssystem

$$\frac{\partial A}{\partial X} = 0$$

$$\frac{\partial A}{\partial Y} = 0 \text{ usw.}$$

ermitteln.

In der Elastizitätslehre interessieren neben der Verschiebungsarbeit für die elastische Längenänderung (Dilatationsarbeit) auch die Verschiebungsarbeit für elastische Torsion (Torsionsarbeit)

$$A = M\,\vartheta\,l$$

wo M das Torsionsmoment und ϑ den Torsionswinkel, l die Länge des tordierten Stabes bedeutet, und die Verschiebungsarbeit für elastische Biegung (Biegungsarbeit)

$$A = \frac{P.f}{2}$$

wo P die in der Mitte des freiaufliegenden Stabes angreifende Kraft und f die Durchbiegung bedeuten (Fig. 9).

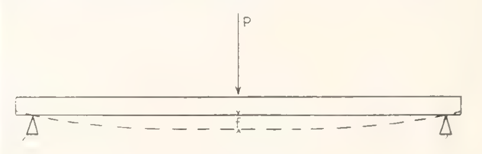


Fig. 9.

Der Begriff der Verschiebungs- resp. Formänderungsarbeit wird auch bei Formänderungen, die die Elastizitätsgrenze überschreiten, verwendet. Nach dem Vorgang von Tetmajer zieht man die Deformationsarbeit, welche aufgewendet werden muß, um einen Probekörper eines bestimmten Materials durch Zug, Biegung oder Torsion zum Bruch zu bringen, zur Beurteilung der Zug-, Biegungs- oder Torsionsfestigkeit des Materials heran. Zur Bestimmung dieser Arbeit dienen die Festigkeitsmaschinen, welche selbsttätig Diagramme aufzeichnen, deren Flächeninhalt der Deformationsarbeit proportional ist. Die Figur 10 gibt ein solches Diagramm für die Zerreißung eines Stabes.

Aus den Ausdrücken für die Verschiebungsarbeit hat Steiner den Satz abgeleitet: Die Arbeiten, durch die ähnliche Deformationen ähnlicher Körper gleichen Materials innerhalb der Elastizitätsgrenze hervorgebracht werden, verhalten sich wie die Gewichte der Körper.

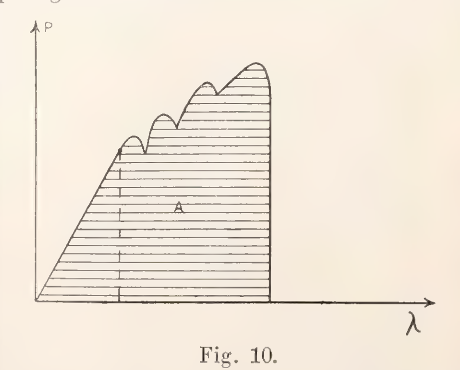


Fig. 10.

Diesen Satz hat Kick auch auf Formänderungen oberhalb der Elastizitätsgrenze übertragen und mit dem Namen „Gesetz der proportionalen Widerstände“ belegt. Dieses Gesetz ist für eine Anzahl Materialien durch Versuche hinreichend gesichert und leistet in der mechanischen Technologie gute Dienste zur Vorausbestimmung des Arbeitsbedarfes bei technischen Formänderungsvorgängen (Pressen, Ziehen, Stanzen usw.) aus Versuchen an kleinen Probekörpern.

β) Flüssige und gasförmige Körper. Ein Beispiel für die Arbeitsfähigkeit gasförmiger und dampfförmiger Körper bietet der Arbeitsprozeß der Wärmemotoren. Hier drückt im Zylinder der Maschine ein Gas oder Dampf auf den Kolben und leistet dabei Expansionsarbeit. Da der Gasdruck im Zylinder und damit die auf den Kolben ausgeübte Druckkraft veränderlich ist, kann zunächst die Arbeit nur für ein kleines Wegelement ds des Kolbens bestimmt werden.

$$dA = Fpds,$$

wo F den Zylinderquerschnitt bedeutet (Fig. 11). Die Arbeit, die das Gas leistet,

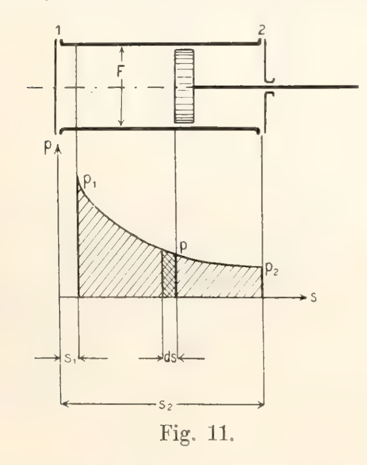


Fig. 11.

wenn sich der Kolben von einem Ende des Zylinders zum anderen bewegt, findet man hieraus durch Integration über den ganzen Kolbenweg

$$A = F\int_{s_1}^{s_2} pds$$

Kennt man hier den Zusammenhang zwischen p und s, dann kann A ermittelt werden.

Der umgekehrte Fall liegt vor bei der Kompressionsarbeit. Uebt man eine Druckkraft auf den Kolben, indem man ihn vom Zylinderende 2 gegen 1 hinschiebt, so wird von der Druckkraft Arbeit auf das Gas geleistet, die sich analog den obigen Formeln berechnet.

4. Messung der Arbeit und Leistung.

4a) Einheiten. Die Arbeitseinheit im absoluten Maßsystem heißt:

Erg = Dyne mal Zentimeter.

Ein Erg ist die Arbeit, die die Krafteinheit einer Dyne leistet, wenn sie längs des Weges 1 Centimeter wirkt.

Dimension = $(gr\ cm^2\ sec^{-2})$

Die Arbeitseinheit des technischen Maßsystems heißt:

Meterkilogramm (mkg) = Kilogrammgewicht mal Meter.

Es ist:

$$1\ mkg = 98\ 100\ 000\ Erg.$$

Das Erg ist also ein verhältnismäßig kleiner Arbeitsbetrag. Oft benutzt man darum 10000000 Erg als neue Einheit, die man 1 Joule nennt. Also ist:

$$1\ mkg = 9{,}81\ Joule.$$

Die Leistung oder der Effekt ist die Arbeit in der Zeiteinheit. Die absolute Einheit des Effektes ist das Sekunden-Erg $(gr\ cm^2\ sec^{-3})$.

Im technischen Maßsystem ist die Leistungseinheit die Pferdestärke:

1 PS = 75 mkg: sec = 75 × 9,81 Joule: sec.

Die Leistung:

1 Joule: sec heißt Watt, also ist 1 PS = 75 × 9,81 Watt = 736 Watt.

Ferner gilt:

1 Kilowatt = 1000 Watt = 1,36 PS
1 Wattstunde = 3600 Joule = 367 mkg
1 Kilowattstunde = 367000 mkg
1 Pferdekraftstunde = 270000 mkg.

Die Beziehungen zwischen Wärme und Arbeit werden wie folgt zahlenmäßig festgestellt:

1 kg Kalorie = 426 mkg
1 Pferdekraftstunde = 636 Kal.
1 Kilowattstunde = 867 Kal.

4b) Meßmethoden. Die Arbeitsmessungen haben den Zweck, die Arbeitsbilanz der physikalischen und technischen Arbeitsprozesse aufstellen zu können.

Bei Wärmemotoren handelt es sich hierbei um

α) Messung der verfügbaren Wärmemenge,
β) Messung der indizierten Arbeit,
γ) Messung der effektiven oder Nutzarbeit.

Die Messungen zu α) laufen im wesentlichen auf Gewichts- oder Volumenmessungen am Brennstoff hinaus nebst kalorimetrischer Bestimmung des Heizwertes des Brennstoffes (vgl. den Artikel „Kalorimetrie“).

Zur Messung der indizierten Arbeit ist erforderlich die Feststellung des Indikatordiagramms der Maschine und ihrer minutlichen Umlaufzahl.

Das Indikatordiagramm wird mittels des Indikators (Fig. 12 und 13) genommen, der die im Arbeitszylinder herrschenden Drücke p_i

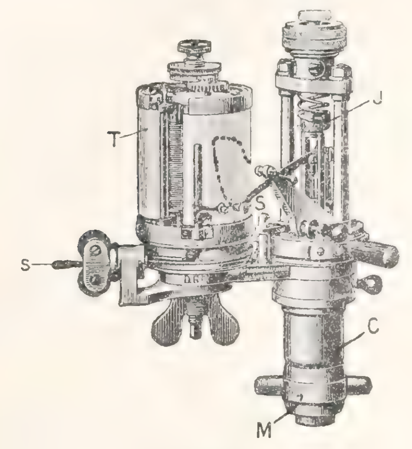


Fig. 12.

der Arbeitsflüssigkeit in ihrer Abhängigkeit vom Kolbenwege s aufzeichnet. Der Indikator besteht aus einem kleinen Dampfzylinder C, der durch eine Ueberfallmutter M und Gewinde G an den Cylinder der zu untersuchenden Dampfmaschine angeschraubt wird. Im Zylinder C bewegt sich möglichst dampfdicht eingeschliffen der Kolben K, dessen Bewegung durch einen Geradführungsmechanismus proportional auf den Schreibstift S übertragen wird, wobei die Kolbenwege und damit die auf den Kolben ausgeübten Dampfdrücke den Verkürzungen oder Verlängerungen der Indikatorfeder J proportional werden.

Fig. 13.

Am Zylinder C ist ferner eine Schreibtrommel T angebracht, die vermittels des Schnurlaufs s in eine der hin- und hergehenden Bewegung des Kolbens der Dampfmaschine proportionale Bewegung versetzt wird. Auf dieser Trommel verzeichnet der Schreibstift S das Indikatordiagramm. Das Diagramm (Fig. 14) ist infolge der hin- und hergehenden Bewegung des Kolbens ein geschlossenes und da seine Ordinaten nach dem oben Gesagten den Kolbenkräften und seine Abszissen dem Kolbenweg proportional sind, so ist sein Flächeninhalt der pro Kolbenhub auf den Kolben übertragenen Arbeit proportional. Mit Hilfe des Planimeters (vgl. den Artikel „Flächenmessung") stellt man die mittlere Höhe h_m des Diagramms bezogen auf den Kolbenhub s fest. h_m drückt man in Millimetern aus. Hat man nun durch Prüfung der Indikatorfeder J mittels Gewichtsbelastung den Federmaßstab f des Indikators bestimmt, der angibt, welcher Druck in kg/qcm einem Millimeter Diagrammhöhe entspricht, so ist

$$p_m = f h_m$$

der mittlere Druck im Zylinder pro Hub in kg/qcm. Kennt man jetzt den Kolbenquerschnitt F in qcm, so ist

$$P_m = F \cdot p_m$$

die mittlere Kolbenkraft pro Hub in kg.

Ist schließlich s der Kolbenhub in m und n die minutliche Umlaufzahl, so ist

$$N = 2 F p_m s n$$

die indizierte Arbeit in mkg pro Minute.

Gebräuchlicher ist in der Technik die Angabe der indizierten Arbeit pro Sekunde, d. h. der indizierten Leistung (vgl. den Artikel

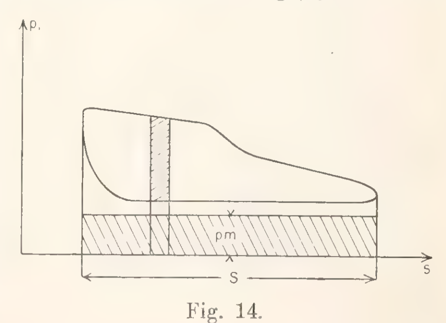


Fig. 14.

„Leistung"). Vorzugsweise gibt man diese in Pferdestärken an.

Es ist

$$L = \frac{2 F p_m s \cdot n}{60 \cdot 75}$$

die indizierte Leistung der Maschine in Pferdestärken.

Zur Messung der effektiven Leistung einer Maschine dienen die Bremsdynamometer. Diese haben die Aufgabe, das von der Maschine erzeugte Drehmoment abzubremsen und dabei zu messen. Mit der Messung der Umlaufzahl resultiert hieraus die Leistungsmessung. Das einfachste Bremsdynamometer ist der Pronysche Zaum, Figur 15.

Es sei S das Schwungrad einer Maschine, die zu bremsen sei. Der Zaum besteht aus zwei Backen BB, die durch Schrauben s_1 s_2 um das Rad S herumgespannt werden. An der einen Bremsbacke ist ein Hebel H an-

gebracht, dessen freies Ende durch Gewichte P belastet werden kann. Durch die Schrauben $s_1 s_2$ wird die Reibung zwischen den Backen BB und dem Rad S so geregelt, daß das Reibungsmoment dem Moment P.l bei konstanter minutlicher Umlaufzahl n dauernd gleich ist, wobei l den Radius des Schwungrades bedeutet. Durch Wasserzuführung zwischen die Backen und das Rad wird für gleichmäßigen Gang und Abführung der freiwerdenden Wärme gesorgt; Störungen des

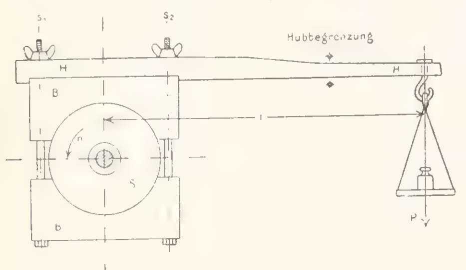


Fig. 15.

den Gleichgewichtes hält eine Hubbegrenzung in nötigen Schranken. Nach diesen Festsetzungen ist die effektive Arbeit pro Minute in mkg

$$N_e = 2\pi P l n$$

und die effektive Leistung in Pferdestärken

$$L_e = \frac{2\pi P l n}{75 . 60}$$

wenn P in kg und l in Metern gemessen ist.

Neben dieser einfachsten Form des Pronyschen Zaumes existieren noch verbesserte für selbsttätige Regulierung und Ausgleich des Eigengewichtes, auf die wir hier nicht eingehen.

Eine andere Form von Bremsdynamometer ist die Wirbelstrombremse Figur 16.

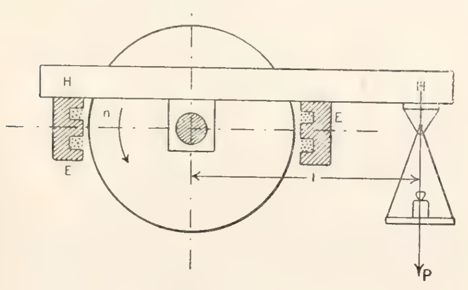


Fig. 16.

Bei dieser sind die Backen BB durch zwei Elektromagnete EE ersetzt, die durch ihre das Schwungrad durchsetzenden Kraftlinien Hysteresis- und Wirbelstromarbeit erzeugen, die ganz analog dem Pronyschen Zaun durch das Produkt

$$L = \frac{2\pi P l n}{75 . 60}$$

gemessen wird. Die Wirbelstrombremse zeichnet sich durch Bequemlichkeit und leichte Regulierbarkeit aus.

Technisch verwendet werden noch die Transmissionsdynamometer, von denen das von Kittler nachstehend dazu diene, das Wesen dieser Apparate zu kennzeichnen Figur 17. Zwei gleiche Zahnräder R_1 und R_3

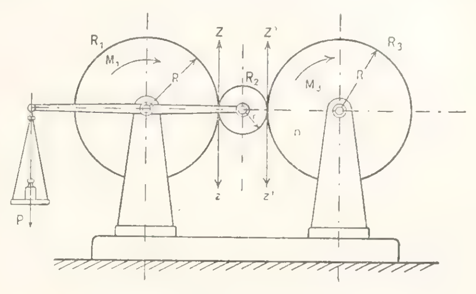


Fig. 17.

stehen miteinander durch ein Zahnrad R_2 im Eingriff. R_1 und R_3 sind fest gelagert, R_2 am einen Ende eines um den Mittelpunkt von R_1 schwingenden Hebels. Das andere Ende des Hebels kann durch Gewichte P belastet werden.

Wird in R_1 ein Drehmoment M_1 eingeleitet, welches von R_3 abgenommen wird, so entstehen an den Berührungspunkten von R_2 Zahndrücke Z resp. Z^1, die einander gleich sind, R_2 im Gleichgewicht halten, und deren Summe bei P gemessen wird.

Kennt man noch die minutliche Umlaufzahl n, dann ist die zwischen R_1 und R_3 übertragene Leistung in Pferdestärken:

$$L = \frac{2\pi Z R n}{60 \quad 75}$$

wenn Z in kg, R in Metern gemessen wird. Eine besondere Stelle nehmen schließlich die Torsionsdynamometer ein. Sie gestatten an Maschinen mit langen Wellen die Leistungsmessung im gewöhnlichen Betriebe (ohne künstliche Bremsung).

Die Figur 18 zeigt das Schema einer

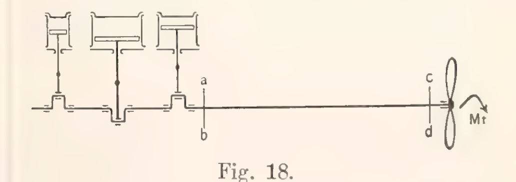


Fig. 18.

Schiffsdampfmaschine. Die lange Welle zwischen Antriebsmaschine und Schiffsschraube wird im Betriebe durch das zu übertragende arbeitende Moment M meßbar tordiert. Die Torsion wird gemessen durch den Winkel φ, um den sich die Wellenquer-

schnitte ab und cd gegeneinander verdrehen. Das Torsionsmoment M_t ist proportional dem Winkel φ:

$$M_t = c.\varphi$$

Die Konstante c bestimmt sich aus den bekannten Elastizitätseigenschaften des Wellenmaterials und den Wellenabmessungen. Zusammen mit der ebenfalls zu messenden Umlaufzahl der Welle ergeben sich dann effektive Arbeit und Leistung. Mittels dieses Verfahrens wurde es möglich, den mechanischen Wirkungsgrad selbst der größten Schiffsdampfmaschinen zu bestimmen. Die Messung des Winkels φ erfolgt entweder mittels elektrischer Kontaktmarken auf einer rotierenden Trommel oder auf mechanischem Wege.

5. Wirkungsgrad und Wirtschaftlichkeit bei der Umwandlung und Uebertragung von Arbeit. Alle Vorgänge der Natur bestehen in Form- oder Ortsveränderungen von Arbeitsfähigkeit oder Energie.

Die Aufgabe der Technik besteht darin, solche Energieumformungen und Energieübertragungen zur Leistung bestimmter, für die Lebenserhaltung und Lebenssteigerung nötigen Arbeiten zielbewußt zu organisieren. Die Hilfsmittel hierzu sind die Maschinen (vgl. die Artikel „Maschinen", „Wärmemaschinen", „Transportmaschinen").

Nun lehrt die Erfahrung, daß jede Arbeitsumformung und jede Arbeitsübertragung mit Verlusten an Arbeitsfähigkeit verbunden ist. Sie möglichst klein zu machen, ist eine Hauptaufgabe der wissenschaftlichen Technik.

Das Maß, inwieweit dieses Ziel erreicht ist, bildet der Wirkungsgrad oder Nutzeffekt. Er gibt an, welcher Bruchteil der in den Arbeitsprozeß hineingegebenen Leistung das gewünschte Ziel erreicht, also entweder in der gewünschten neuen Form erhalten oder an dem gewünschten Ort abgeliefert wird.

In den meisten Fällen ist es zur Ermittlung des Wirkungsgrades nötig, den Arbeitsprozeß einer Maschine in seine physikalischen Grundbestandteile zu zerlegen. Der gesamte Arbeitsprozeß der Maschine zerfällt dadurch in eine Anzahl von Teilprozessen, von denen jeder einzelne einen Wirkungsgrad hat. Das Produkt der Wirkungsgrade der Einzelprozesse ergibt dann den Wirkungsgrad des Gesamtprozesses.

Bei einer Dampfmaschine hat man hiernach zunächst Anlaß, von einem Wirkungsgrad η_v des Verbrennungsprozesses zu reden, der sich in der Feuerung des Dampfkessels abspielt. Niemals wird die ganze, im Brennmaterial zur Verfügung stehende Wärme in der Feuerung zur Entwickelung gebracht. Verbrennt man in der Zeiteinheit B kg eines Stoffes vom Heizwert H, so wird die Wärme entwickelt

$$Q = \eta_v \; B.H.$$

Bei einer Explosionsmaschine wird

$$\eta_v = 1,$$

da hier der Verbrennungsprozeß sich in dem Arbeitszylinder selbst vollzieht und die ganze, dabei entwickelte Wärme dem Arbeitsprozeß zugute kommt.

Der Uebergang der Wärme an die Arbeitsflüssigkeit wird bestimmt durch den Wirkungsgrad der Feuerung η_f, d. h. durch den Bruchteil der entwickelten Wärmemenge, der von den Feuerungsgasen auf den Kessel übergeht. Bei Explosionsmotoren ist wiederum $\eta_f = 1$.

Weiterhin fragt man nach dem Wirkungsgrade, mit dem sich in der Wärmemaschine die Umwandlung der Wärmeform der Arbeit in die mechanische Form vollzieht.

Die Wärmetheorie lehrt, daß im besten Falle der Bruchteil

$$1 - \frac{T_2}{T_1}$$

der in den Arbeitsprozeß hineingegebenen Wärme als mechanische Arbeit gewonnen werden kann, falls die Arbeitsflüssigkeit den idealen Arbeitsprozeß (Carnotscher Kreisprozeß) zwischen den Temperaturen

$$T_2 \text{ und } T_1$$

vollzieht. Die diesem Prozeß entsprechende Arbeit heißt die disponible oder maximale und

$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

ist sein idealer oder theoretischer Wirkungsgrad.

Ein solcher Kreisprozeß ist praktisch aber nicht durchführbar. Man muß also einen weiteren Verlust in Kauf nehmen, der auf Rechnung der Unvollkommenheit des Arbeitsprozesses zu setzen ist. Diesem Verlust trägt der indizierte Wirkungsgrad η_i Rechnung, der angibt, wieviel von der disponiblen Arbeit sich als indizierte Arbeit L_i wiederfindet. Es ist also

$$A.L_i = \eta_{th}.\eta_i Q$$

das Produkt $\eta_{th}.\eta_i$ heißt auch thermischer Wirkungsgrad η_t

$$\eta_t = \eta_{th}.\eta_i$$

Die indizierte Arbeit ist die aus Q erzeugte mechanische Arbeit, die auf den Mechanismus (Kolben- und Kurbelgetriebe) des Wärmemotors übertragen wird. Die Weiterleitung der indizierten Arbeit durch diesen Mechanismus an den Umfang des Schwungrades der Maschine bedingt einen weiteren Verlust durch Reibung, den man durch Festsetzung des mechanischen Wirkungsgrades η_m bestimmt. Am Umfang des Schwungrades wird die Nutzarbeit N_e (effektive Arbeit oder Bremsarbeit) abgenommen und es ist:

$$N_e = \eta_m.L_i$$

Das Produkt:

$$\eta = \eta_v \cdot \eta_f \cdot \eta_{th} \cdot \eta_i \cdot \eta_m$$

heißt der **Gesamtwirkungsgrad** des Motors. η gibt also an, wieviel von der im Brennmaterial (Kohle, Gas, Petroleum, Spiritus, Benzin) enthaltenen Wärme durch die Wärmemotoranlage in Nutzarbeit verwandelt wird.

Die Verteilung der oben geschilderten Verluste auf die einzelnen Teile einer Kraftmaschinenanlage zeigen die Diagramme. Figur 19 und 20.

Figur 19 zeigt die „Wärmebilanz“ der Dampfmaschine. Das Diagramm soll zeigen, wie die Wärme oder die Arbeit durch die Maschine hindurchwandert und wie sich unterwegs die einzelnen Verluste abzweigen, Die in die Feuerung in Gestalt von Kohlen

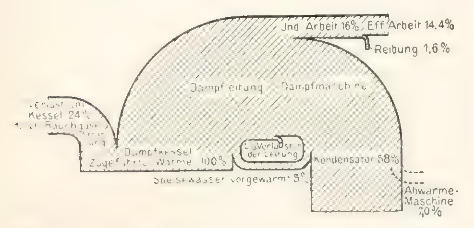


Fig. 19. Wärmebilanz der Dampfmaschine.

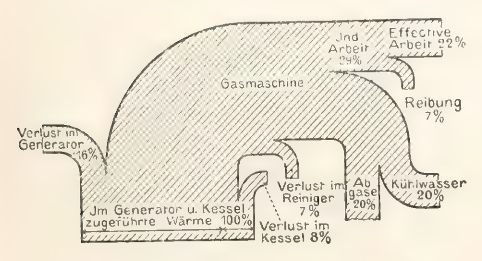


Fig. 20. Wärmebilanz der Gaskraftmaschine.

eingeführte Wärmemenge wird gleich 100 gesetzt. Bei der Verbrennung der Kohle wird nun gemäß dem Wirkungsgrade der Verbrennung nicht die ganze disponible Wärme frei, da ein gewisser Prozentsatz der Kohle unverbrannt durch den Rost fällt oder mit der Verbrennungsluft in den Schornstein geführt wird. Der hierbei resultierende Wärmeverlust ist im Diagramm mit dem viel wichtigeren Verlust durch die Feuerung, durch Rauchgase und Strahlung (η_f) zusammengenommen. Es resultiert hierbei der Wirkungsgrad des Kessels mit 0,76 oder 76%. Dieser Anteil geht tatsächlich an das Kesselwasser über.

Dem Kessel werden 5% an Wärme im Speisewasser zugeführt, so daß 81% der auf den Rost gebrachten Kohleenergie in die Dampfleitung übergehen. Auf dem Wege vom Kessel zur Dampfmaschine verliert der Dampf 2%, so daß 79% in den Zylinder der Maschine eintreten. Im Zylinder findet jetzt durch den Prozeß der Umwandlung der Wärme in Arbeit ein gewaltiger Verlust statt, indem nur 16% der dem Kessel zur Verfügung gestellten Energie in Gestalt von indizierter Arbeit auf den Kolben der Maschine übertragen werden; alles übrige, d. h. 63% werden im Kondensator der Maschine abgeführt. Von diesen 63% werden 5% mit Hilfe der Speisewassrevorwärmung wieder in den Kessel gebracht. Der Rest (58%) ist verloren, wenn man nicht durch Aufstellung einer Abwärmemaschine noch etwa 7% ausnutzen kann.

Von den 16%, die als indizierte Arbeit im Zylinder gewonnen wurden, gehen nun noch weitere 1,6% durch Reibung im Getriebe der Maschine verloren, so daß am Schwungrad der Maschine im besten Falle 14,4% der im Kessel verfeuerten Kohlenenergie zur Verfügung stehen. 0,144 würde also der Gesamtwirkungsgrad der Dampfmaschinenanlage sein.

Die Wärmebilanz der Gasmaschine und zwar zusammen mit einem Gasgenerator (Fig. 20) wird hiernach leicht zu verstehen sein. Als Gesamtwirkungsgrad resultiert 0,22, alles übrige d. h. 78% der der Anlage zur Verfügung gestellten Energie gehen in den einzelnen Teilen der Maschine verloren.

Gelten die beiden Wärmebilanzen Figur 19 und 20 für zwei wichtige Typen moderner Maschinen, so soll uns Figur 21 zeigen, wie sich

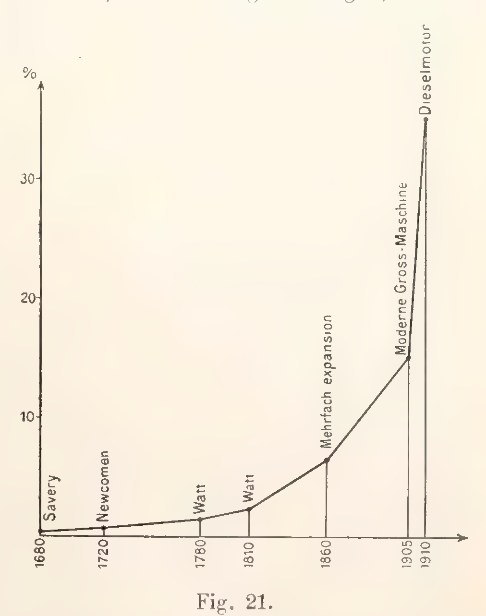


Fig. 21.

die Gesamtwirkungsgrade wärmemotorischer Anlagen seit Saverys Auftreten bis auf unsere Tage vervollkommnet haben. Von Wirkungsgraden von 0,003 und darunter ist man heute mit 0,36 beim Dieselmotor, der

wärmetechnisch vollkommensten Maschine der Gegenwart, angekommen.

Wie sich heute die wichtigsten Wärmemotoren hinsichtlich ihrer Wirkungsgrade zueinander verhalten, zeigt Figur 22, in der dargestellt ist, wieviel Energie in Gestalt von Wärme man den einzelnen Maschinentypen zur Verfügung stellen muß, um am Schwungrade eine effektive Pferdekraftstunde gleich 636 kg-Kal. zu erhalten. Wir sehen, am rationellsten ist der Dieselmotor, er geht am sparsamsten mit der ihm anvertrauten Wärmeenergie um. Verschwen-

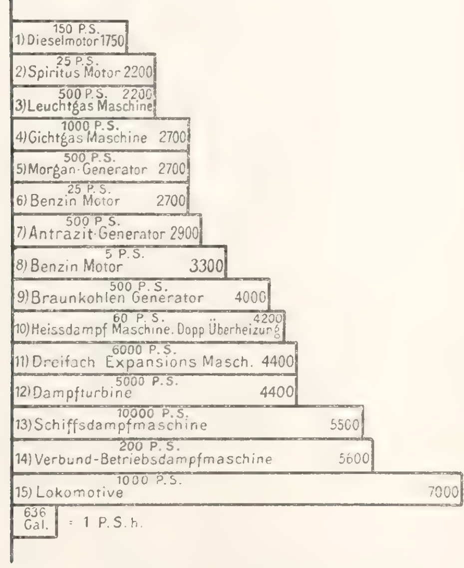


Fig. 22. Vergleichende Uebersicht der Oekonomie der heutigen Wärmekraftmaschinen. Wärmeverbrauch in Kalorien für die eff PS-Stunde.

derischer arbeiten die übrigen Explosionsmotoren, noch unrationeller die Dampfmaschinen, von denen die Lokomotiven den größten Wärmeverbrauch berechnet auf die effektive PS-Stunde aufweisen.

Durch Division der bei den einzelnen Typen angegebenen Zahlen in 636 erhält man natürlich die Ziffern für die Gesamtwirkungsgrade.

Analog liegen die Verhältnisse bei anderen Arbeitsumformungen. Bei Turbinen, Wasserrädern, Elektromotoren usw. fallen die durch den Wärmeprozeß bedingten gewaltigen Verluste fort und es werden Wirkungsgrade bis zu 0,9 und darüber erreicht.

Von dem Wirkungsgrad sehr wesentlich bestimmt, aber nicht allein von ihm abhängig ist die Wirtschaftlichkeit einer Maschine. Was man darunter versteht und welche Faktoren sie bestimmen, soll hier noch kurz erörtert werden.

Die Wirtschaftlichkeit einer Maschine kommt zum Ausdruck in dem Preise, zu dem die Maschine die Energieeinheit abzugeben imstande ist; je niedriger er ist, desto größer die Wirtschaftlichkeit. An der Bildung dieses Preises beteiligen sich:

1. Die Kosten für die der Maschine zugeführte Ausgangsenergie (Kohle, Petroleum, Gas usw.).
2. Die Betriebskosten (Schmier- und Putzmaterial, Instandhaltung, Reparatur).
3. Verwaltungs- und Lohnkosten.
4. Kapitalkosten (Verzinsung und Tilgung des Anlagekapitals).

Von diesen Kosten nennt man 1 und 2 die beweglichen, weil sie sich ganz nach der abgegebenen Engeriemenge richten; 3 und 4 aber die festen, weil sie unabhängig von der Energielieferung feststehende Lasten darstellen. Die festen Kosten bringen auf den Preis der gelieferten Energieeinheit einen um so größeren Anteil, je weniger man die Leistungsmöglichkeit der Maschine ausnutzt. Es folgt daraus, daß eine Maschine um so wirtschaftlicher arbeitet, je gleichmäßiger ihre Belastung ist.

Diese Tatsache spielt bei der Tarifpolitik moderner Elektrizitätswerke die bestimmende Rolle. Bekanntlich sind unsere Elektrizitätswerke in den Abendstunden durch die elektrische Beleuchtung voll in Anspruch genommen, während die Energielieferung in den Tagesstunden relativ gering ist. Um möglichst wirtschaftlich zu arbeiten, müssen die Werke bemüht sein, möglichst viele Tageskonsumenten heranzuziehen, um auch am Tage die teure Anlage voll auszunutzen. Die verschiedenen Tarife bemühen sich, durch die Abstufung der Energiepreise je nach der Bezugszeit sowie durch Rabatte auf gleichmäßigen Energiebezug ihre Benutzungszeit heraufzusetzen und so die Wirtschaftlichkeit des betreffenden Werkes zu verbessern.

Literatur. ***d'Alembert,*** *Traité de dynamique, Paris 1743.* — ***Galilei,*** *Discorsi e demostrazioni intorno a due nuove sienze, Leida 1638.* — ***Coriolis,*** *Traité de la mécanique des corps solides et du calcul de l'effet des machines, Paris 1829.* — ***E. Düring,*** *Kritische Geschichte der Allgemeinen Prinzipien der Mechanik, 1872.* ***E. Mach,*** *Die Mechanik in ihrer Entwickelung historisch und kritisch dargestellt, 1830.* — ***Todhunter,*** *History of the Theory of elasticity, Cambridge 1886/94.* — ***Müller-Breslau,*** *Die graphische Statistik der Baukonstruktionen, Berlin 1887.* — ***Riecke,*** *Lehrbuch der Physik, 1908.* — ***Chwolson,*** *Lehrbuch der Physik, 1902.* — ***H. Lorenz,*** *Technische Wärmelehre, 1904.* — ***Derselbe,*** *Technische Mechanik starrer Systeme, 1902.* — ***Gramberg,*** *Technische Messungen bei Maschinenuntersuchungen und im Betriebe, 1910.*

W. Hort.

Archäicum.

1. Definition 2. Entstehung 3. Gliederung und Einteilung 4. Fossilienführung 5. Das paläogeographische Alter der archäischen Gebiete 6. Verbreitung 7. Oekonomischer Wert. Erze.

1. Definition. Unter der Bezeichnung Archäicum oder archäische Gruppe faßt man jetzt allgemein alle die aus kristallinen Schiefern, Gneisen, Graniten und anderen Eruptivgesteinen bestehenden Grundgebirgskomplexe zusammen, für welche ein frühpräcambrisches Alter nachgewiesen oder wahrscheinlich gemacht werden kann. Der Name archäisch wurde 1876 von J. D. Dana vorgeschlagen, und zwar damals als Bezeichnung für alle Formationen, die älter als die ältesten versteinerungsführenden paläozoischen Systeme sind.

Später hat man jedoch, sowohl in Nordamerika als auch in Europa, China usw. eine Reihe Sedimentformationen vorcambrischen Alters kennen gelernt, welche ihrer Beschaffenheit nach vollkommen klastisch sind, in keiner Hinsicht von jüngeren schichtigen Gesteinen abweichen und auch durch deutliche Diskordanzen von den darunterliegenden kristallinen Basalkomplexen getrennt sind.

Erstere hat man aus der Gesamtheit des Präcambriums (vgl. den Artikel „Präcambrium“) als eine besondere jüngere, zwischen Paläozoicum und Archäicum liegende Gruppe abgetrennt, so daß das Archäicum jetzt nur den ältesten Teil der vorcambrischen Bildungen umfaßt. Da jedoch die Altersbestimmung innerhalb Formationen, in denen man keine sicher erkennbaren fossilen Reste gefunden hat, sehr schwierig ist, kann man nicht bestimmt sagen, ob die archäischen Komplexe in den verschiedenen Ländern einander chronologisch vollständig entsprechen.

Archäicum bedeutet also dasselbe wie sehr altes Grundgebirge oder mit anderen Worten Urgebirge, wie es auch häufig, besonders in Skandinavien, benannt wird.

Früher nahm man an, die kristallinen Basalkomplexe, welche überall auf der Erde unter den versteinerungführenden Sedimenten lagern, besäßen stets sehr hohes Alter, so daß die Begriffe kristalliner Basalkomplex oder Grundgebirge und Archäicum oder Urgebirge einander vollkommen entsprächen.

Wie man jetzt weiß, hat ein Teil der Komplexe kristalliner Schiefer ihre jetzige Beschaffenheit viel später als in archäischer Zeit, d. h. während paläozoischer, teilweise sogar mesozoischer oder tertiärer Zeit erhalten.

Da jedoch das Grundgebirge jüngeren Alters sowie das Archäicum oft in der Hauptsache dieselbe petrographische Beschaffenheit aufweisen, haben sich auch die Auffassungen über ihre Entstehung gleichzeitig entwickelt, um so mehr als es in vielen Fällen schwierig ist, bestimmt zu entscheiden, welche von den kristallinen Komplexen archäisch und welche davon jüngeren Alters sind. So ist z. B. das sächsische Granulitgebiet und die Gneisformation des Erzgebirges, welche früher als klassisches Urgebirge angesehen wurden, nach H. Credner und Gäbert von paläozoischem Alter.

2. Entstehung. Die Frage nach der Entstehung des Archäicums ist vor allem petrographischer Natur. Nach ihrer Beschaffenheit weichen die dasselbe aufbauenden kristallinen Schiefer, Gneise, Granite usw. mehr oder weniger stark von allen den Sedimenten und vulkanischen Eruptivgesteinen ab, welche während späterer geologischer Zeiträume gebildet wurden und noch heutigen Tages durch die aktuellen Ursachen vor unseren Augen entstehen. Ihre kristalline Beschaffenheit und viele ihrer übrigen Eigenschaften haben diese Gesteine unter Verhältnissen erworben, welche unserer direkten Erfahrung mehr oder weniger fremd sind und nur durch Apriori- oder Analogieschlüsse erklärt werden können.

Zwei prinzipiell verschiedene Deutungen der eigentümlichen Natur der Gesteine des Archäicums sind möglich und sind auch seit den ältesten Zeiten dafür verwendet worden.

Nach der einen legt man das Hauptgewicht auf ihr Alter. Man nimmt hier an, indem man konsequent nach der Kant-Laplace'schen Theorie schließt, daß sie während einer Zeit gebildet wurden, wo die Verhältnisse auf der Erdoberfläche so sehr von den jetzigen Verhältnissen abwichen, daß die Bedingungen für die Gesteinsbildung damals ganz anderer Art waren.

Ungeheuere Massen schmelzflüssigen Magmas, so stellt man sich vor, ergossen sich damals über die Erdoberfläche und nahmen bei der Erstarrung infolge der bedeutenden Wärme und unter dem Drucke einer Atmosphäre, welche in Gasform alles Wasser, was jetzt die Meere bildet, sowie große Mengen von Kohlensäure, Schwefel, Chlor usw. enthielt, dieselbe körnige Struktur an, welche Magmagesteine jetzt erst in größerer Tiefe unter der Oberfläche erhalten. Die Masseneruptionen waren von entsprechenden Mengen vulkanischer Asche begleitet. Nachdem die Temperatur so weit gesunken, daß ein Urmeer entstehen konnte, besaß letzteres anfangs noch mehr als 100° Wärme. Silikatminerale konnten sich in diesem Meere durch direkte Auskristallisation aus heißen Lösungen bilden,

welche die Tuffschichten zugleich verkitteten und in gewissen Fällen umwandelten.

In dieser Weise lagerten sich, so nahm man an, zuerst hauptsächlich gneisähnliche Gesteine, dann Glimmerschiefer, Hornblendeschiefer usw. ab und schließlich, zu einer Zeit, wo die Verhältnisse auf der Erdoberfläche schon mehr den später herrschenden glichen, Phyllite, Tonschiefer usw. Gemäß der klassischen Dreiteilung, welche man noch recht häufig zitiert findet, zerfiel das Archäicum somit in eine Gneis-, eine Glimmerschiefer- und eine Phyllit-Tonschieferformation.

Diese Auffassung, wonach das Archäicum unter Verhältnissen entstand, welche von den jetzt herrschenden (aktuellen) ganz verschieden, also „exzeptionell", waren, kann als die exzeptionalistische (oder auch kataklysmatische) Auffassung des Archäicums bezeichnet werden. Sie wird auch von einem ihrer Anhänger, Sterry Hunt, bezeichnend genug, die chaotische genannt.

Man findet sie noch in einer Menge verschiedener Variationen, besonders in populären und halbwissenschaftlichen Arbeiten, worin sie oft noch als „die bisher von fast sämtlichen Geologen geteilte" Ansicht bezeichnet wird.

Doch schon früh machte sich eine andere, entgegengesetzte Auffassung des Archäicums und des Grundgebirges im allgemeinen geltend. Diese legt das Hauptgewicht auf den Umstand, daß die kristallinen Komplexe eine tiefere Lage als alle darüberliegenden klastischen Sedimentformationen einnehmen. Selbst da, wo sie jetzt zutage liegen, müssen sie früher von mächtigen Gesteinsmassen bedeckt gewesen sein, die später durch die Denudation entfernt wurden. Die archäischen Bildungen können somit in großer Tiefe hoher Wärme, starkem Drucke, wässerigen und gasförmigen Emanationen aus dem heißen Erdinneren und anderen ähnlichen Agentien ausgesetzt gewesen sein, welche sie dort umgewandelt, teilweise vielleicht umgeschmolzen haben. Gesteine, welche ursprünglich dieselbe Beschaffenheit besessen haben mögen, wie die durch aktuelle Ursachen an der Erdoberfläche gebildeten (superkrustalen) Formationen, können daher durch eine in der Tiefe vorsichgegangene Metamorphose eine veränderte kristalline Beschaffenheit erhalten haben, während andere Urgebirgsbildungen direkt durch die Erstarrung geschmolzener Magmamassen in großer Tiefe entstanden.

Obgleich diese aktualistische Auffassung des Archäicums in ihrer einfachsten Form schon durch den großen Lehrmeister der Geologie, Hutton, ausgesprochen und später von Lyell weiter ausgebaut wurde und die theoretisch möglichen, verschiedenen Formen der Metamorphose schon von den französischen und deutschen Forschern in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts, also während der heroischen Periode der Geologie, ausgedacht worden waren, währte es noch lange Zeit, ehe eine plausible Erklärung der Einzelheiten der Metamorphose oder eine für Kartierungszwecke anwendbare, auf jenen Theorieen fußende Einteilung und Terminologie der kristallinen Schiefer geschaffen wurde.

Erst nachdem die Gesteinslehre nach Einführung des Mikroskops, und besonders durch die fleißige Arbeit der deutschen petrographischen Schule unter F. Zirkel und H. Rosenbusch, eine derartige Entwickelung erreicht hatte, daß jedes Eruptivgestein in ein geordnetes System eingereiht, nach Struktur und Mineralbeschaffenheit genau bestimmt und aus letzteren die Entstehungsbedingungen abgelesen werden konnten, kam das Studium der kristallinen Schiefer wieder an die Reihe.

Seit einigen Jahrzehnten hat die Frage nach der Entstehung des Archäicums wieder auf der Tagesordnung gestanden und in den großen Zügen ihre Lösung gefunden, obgleich der Streit darum noch fortdauert. Da diese ältesten und untersten Bildungen uns sowohl zeitlich, als auch räumlich am entferntesten liegen, so ist es klar, daß die geologische Forschung, deren Vorschreiten naturgemäß von oben nach unten vor sich geht, erst zuletzt die Frage nach ihrer Entstehung anschneiden konnte, und es dürfte daher noch lange dauern, ehe vollständige Einigkeit darin erzielt wird.

Sucht man dieses Problem von induktiven Gesichtspunkten aus zu lösen, d. h. also durch Vergleich mit jüngeren Gesteinsformationen, deren Entstehung uns bekannt ist, so fragt es sich vorerst, ob wir irgendwo noch — trotz der angenommenen Umwandlung — deutlich erkennbare Spuren einer ursprünglichen Beschaffenheit derselben Art vorfinden, wie wir sie bei jüngeren Sedimenten oder bei Eruptivgesteinen, welche sich über die Erdoberfläche ergossen haben, beobachten.

Die grobkörnigen Teile der Sedimente müssen sich natürlich länger erhalten, als die feineren. Es ist daher wahrscheinlich, daß die durch Anhäufung von Geröll entstandenen Konglomerate — auch nach der Umwandlung — eher ihre ursprüngliche Struktur deutlich hervortreten lassen werden als feinkörnigere Gebilde.

In der Tat hat man an vielen Stellen auch in stark umgewandelten archäischen Gesteinskomplexen sicher erkennbare Konglomerate gefunden. Solche scheint zuerst Törnebohm in Schweden, am Ufer

des Wäner Sees (1870), beobachtet zu haben. Viel Aufsehen erregte auch Sauers Fund eines Gneiskonglomerates bei Ober-Mittweida in Sachsen (1879); und obgleich sich dieses später als paläozoischen Alters erwies, so hat diese Entdeckung doch bedeutenden Einfluß auch auf die Auffassung des Archäicums gehabt. Im Archäicum Finnlands trifft man kristallinschiefrige Konglomerate geradezu auf Schritt und Tritt an: in Ylivieska in Oesterbotten, wo sie 1885 von Sederholm zuerst gefunden wurden, in der Tammerforsgegend, von wo derselbe solche i. J. 1893 beschrieb; in Ost-Finnland (von Frosterus 1902 beschrieben), in Lappland (Fig. 1) usw. In Schweden kennt man dieselben, nach Högbom, ebenfalls von verschiedenen Lokalitäten: das Skellefteå-Feld in Norrland, das Grythytte-Feld in Nerike, Småland; die Gegend von Vestanå in Schonen (1884 von De Geer gefunden; äußerst sorgfältig von Bäckström beschrieben) usw.

Ferner hat man auch unter den Gesteinen des nordeuropäischen, sowie auch des nordamerikanischen Archäicums solche gefunden, welche trotz der erlittenen Umwandlung deutlich die charakteristischen Strukturen vulkanischer Gesteine zeigen. Solche sind 1885 von Lawson aus der Rainy Lake-Gegend in Canada, von Sederholm 1890 aus dem südwestlichen Finnland (metamorphosierte Basalte, Andesite usw.) und von Otto Nordenskjöld 1894 aus Småland in Schweden (metamorphosierte Rhyolite, Trachyte usw.) beschrieben worden.

Jedoch nicht nur die sehr grobkörnigen metamorphosierten Sedimente, sondern auch die feinkörnigeren lassen bei genauem Studium viele Züge ihrer ursprünglichen Beschaffenheit deutlich hervortreten.

Man hat so feststellen können, daß unter den Schiefern des Archäicums in Nordeuropa (im sogenannten Fennoskandia) auch solche vorkommen, welche durch Umwandlung von Quarzsand (Quarzite in verschiedenen Stadien der Umwandlung), feldspathaltigem Sand (grauwackenähnliche Phyllite), Ton (dichte Phyllite), basischen und saueren Tuffen usw. entstanden sind. Ex analogia muß man daher schließen, daß auch wenigstens ein Teil der zwischen diesen metamorphosierten Sedimenten eingeschalteten kristallinen Kalksteine durch Metamorphose aus Kalkschlamm oder aus Anhäufungen von Schalen kalkreicher Organismen entstanden sein können.

Das Archäicum wird somit zu einem bedeutenden Teil aus Gesteinen aufgebaut, die ursprünglich normale Sedimente oder vulkanische Ergußgesteine und deren Tuffe waren, aber nachträglich eine mehr oder weniger starke Metamorphose erlitten haben.

Ein sehr großer Teil der im Archäicum auftretenden Gesteine ist aber offenbar auch aus mehr oder weniger stark umgewandelten, in der Tiefe erstarrten Eruptivgesteinen entstanden, wie z. B. aus Graniten, Dioriten (granitische und dioritische Gneise), aus Diabasen (Plagioklasamphibolite oder Metabasite) aus Peridotiten und Olivinfels (Amphibolite, Serpentine, gewisse Talk- und Chloritschiefer). Diese gneisigen Gesteine haben eine Umwandlung erlitten, bei welcher die mechanische Ausquetschung der Minerale und die Bildung paralleler Sprünge und Gleitflächen, auf denen Glimmer und andere fadenähnliche oder blättrige Minerale auskristallisierten, eine sehr wichtige Rolle gespielt haben.

Sowohl die Minerale im kleinen, als auch, in manchen Gegenden, die Gesteinsmassen im großen besitzen oft die durch Ausquetschung verursachte Linsenform.



Fig. 1. Fels von kalewischem Konglomeratschiefer am Ufer des Sees Kuivajärvi. Kuolajärvi in Lappland.

Die moderne Petrographie hat die Metamorphoseprozesse in allen ihren Einzelheiten erforscht (vgl. den Artikel „Minerogenesis und Petrogenesis der metamorphischen Gesteine").

Die Umwandlung der Minerale lassen sich besonders gut nach Lossens Vorbild durch das Studium der Pseudomorphosen nachweisen, bei welchen die Kristallformen der ursprünglichen Minerale noch vorhanden sind, während die Substanz in eine andere umgewandelt ist.

Besonders J. Lehmann, dessen große Arbeit „Untersuchungen über die Entstehung der altkristallinischen Schiefergesteine" auf diesem Gebiet revolutionierend wirkte, Rosenbusch, van Hise, Becke und Grubenmann sind beim Studium der durch die Dynamometamorphose (Druckmetamorphose) hervorgebrachten Wirkungen bahnbrechend gewesen. Nach der Ansicht der Rosenbuschschen Schule soll diese sogar Hauptursache der eigentümlichen Beschaffenheit der archäischen Gesteine sein. Die Wirkung der durch die Wärme der Eruptivmassen und der von ihnen ausgehenden Emanationen verursachten Kontaktmetamorphose hätte sich dagegen auf eine Umkristallisation innerhalb der allernächsten Umgebung beschränkt.

Im Gegensatz hierzu nehmen andere Forscher, besonders die französische petrographische Schule unter Michel-Lévy, Barrois und Lacroix, ferner auch J. Lehmann und eine Menge anderer deutscher Geologen, sowie viele britische, amerikanische und nordische Petrographen an, daß eine weitgehende Injektion von granitischem Material eine große Rolle bei der Entstehung einiger im Archäicum sehr häufiger Gesteine gespielt habe. Besonders im nordeuropäischen Urgebirge besitzen diese Adergneise (Arterite) (Fig. 2) große Verbreitung. Die Aederung

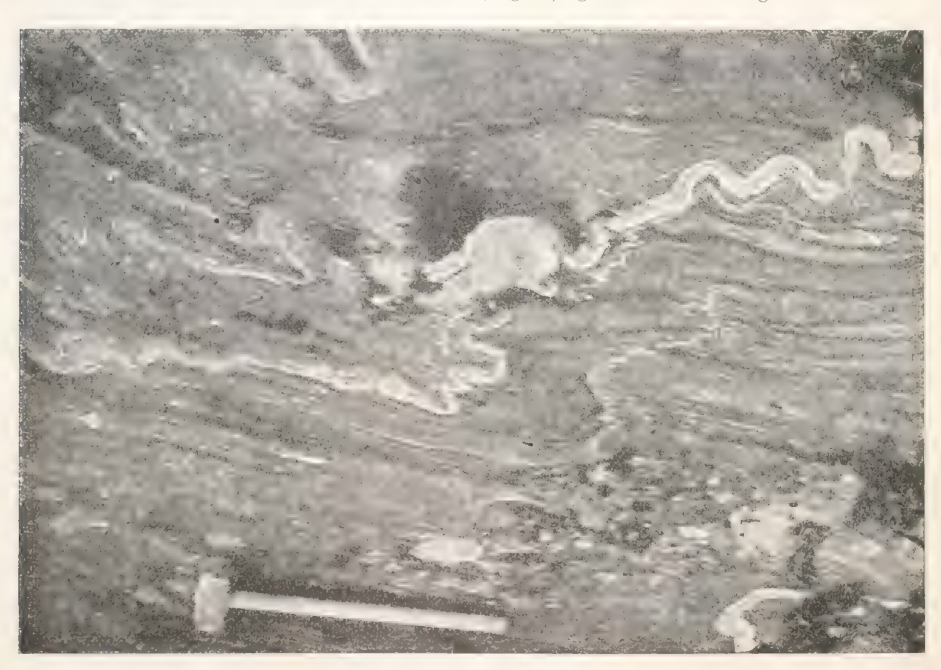


Fig. 2. Adergneis von Kainari in Ylöjärvi, Finland.

ist oft mit einer äußerst starken Faltung verbunden, welche offenbar im Zusammenhang mit dem Eindringen der Adern vor dem völligen Erkalten des Granites entstanden sind. Man kann den Uebergang dieser arteritischen Gesteine mit scharf begrenzten Adern in solche Mischgesteine (Migmatite) verfolgen, in welchen die verschiedenen Komponenten so intim gemengt sind, daß man sie nur schwierig von einander unterscheiden kann. Die migmatitischen Gneise mit vorherrschend schiefrigem Material gehen ihrerseits in migmatitische Granite über, welche von unscharf hervortretenden dunkleren Streifen, Flecken und Flammen erfüllt sind.

In nahem Anschluß an die Intektionslehre erklärt Sederholm die Entstehung migmatitischer Gesteine durch eine teilweise Wiederaufschmelzung sedimentärer Schiefer, oder druckschiefriger Eruptivgesteine, welche in großer Tiefe unter der Oberfläche statt-

gefunden hätte. Unter dem Druck darübergelagerter oder darübergeschobener Gesteinsmassen sind diese Gesteine in solche Tiefen hinabgepreßt worden, daß sie den aus dem schmelzflüssigen Inneren der Erde emporsteigenden granitischen Massen begegneten. Sederholm nennt diesen Prozeß, wodurch schon erstarrte feste Eruptivmassen auch eine erneute „palingene" Eruptivität erhalten können Anatexis.

Schon viel früher hat Lawson sich der gleichen Auffassung einer „subkrustalen Wiederaufschmelzung" bedient, um die eigentümliche Tatsache zu erklären, daß den archäischen Sedimenten gewisser Teile Canadas so oft ein erkennbarer Basalkomplex fehlt, daß sie vielmehr gleichsam in den umgebenden Graniten schwimmen. Auch Adams hat ausgezeichnete Beispiele migmatitischer Gesteine aus dem Archäicum Canadas geschildert. Unter den Forschern, die sich mehr oder weniger bestimmt zugunsten der Wiederaufschmelzungslehren ausgesprochen haben, sind noch Daly, Gavelin, Gürich, Kjerulf, Klemm, Loewinson-Lessing, Philipp, Eduard Suess, Teall und Termier zu nennen.

Wenn nun also auch ein großer Teil der gneisähnlichen Gesteine des Archäicums durch die erwähnten metamorphen und „ultrametamorphen" Prozesse aus superkrustalen Sedimenten und vulkanischen Gesteinen, sowie in der Tiefe erstarrten Eruptivmassen entstanden sind, ist man doch auf mancher Seite geneigt, einem Teil derselben eine andere Herkunft zuzuschreiben.

Was die granitischen Gneise betrifft, welche allein für sich große einförmige Gebiete bilden, so begegnet man immer wieder der Auffassung, sie könnten Teile der ersten Erstarrungskruste der Erde sein. Rosenbusch neigt einer solchen Auffassung zu, ebenso Törnebohm, besonders in betreff der ältesten granitischen Gneise des westlichen Schweden, denen jedoch von anderen Forschern ein jüngeres Alter zugeschrieben wird.

Die Ansicht, die größten Massen der granitischen Gneise wären krustal, Teile der von außen nach innen langsam erstarrenden Erdkruste, braucht jedoch nicht unbedingt mit der Annahme vereinigt zu werden, sie seien in ihrer Gesamtheit vor der Ablagerung der ältesten Sedimente erstarrt. Denn man kann in dieser Erstarrung schwerlich einen ein für allemal abgeschlossenen Vorgang erblicken, sondern die Erdkruste muß in dem Maße, wie die Erosion ihre obersten Teile entfernt, noch heutigen Tages durch Erstarren der darunterliegenden schmelzflüssigen Massen einen Zuwachs von unten erfahren.

Selbst falls Teile der ersten Erstarrungskruste erhalten und sichtbar geblieben sind, können sie schwerlich von solchen Teilen der Kruste getrennt werden, welche später unter einer u. a. auch Sedimente enthaltenden Decke erstarrten, wo aber die erkaltenden Massen zu tief lagen, um mit ersteren in Berührung zu kommen.

Naturgemäß müssen jedoch vor allem die alleraltesten Formationen einer so tiefgreifenden Denudation ausgesetzt gewesen sein, daß die „krustalen" Granitgneismassen an die Oberfläche gelangen konnten und deshalb sind diese in vielen Fällen von sehr hohem archäischen („katarchäischem") Alter.

Die Tatsache, daß die archäischen Bildungen ohne Ausnahme stark disloziert, kristallin und oft in großer Ausdehnung mit Granit gemischt sind, hat zu der Annahme Veranlassung gegeben, die Gebirgsfaltungen seien zu jener Zeit zahlreicher und die eruptive Tätigkeit stärker als in späterer Zeit gewesen. Da die erwähnten Züge als für das Archäicum charakteristisch angesehen werden und man somit, sobald man Sedimente hohen Alters trifft, die nicht ebenso stark disloziert und umgewandelt sind, dieselben vom Archäicum abzutrennen geneigt wäre, obgleich sie möglicherweise gleichaltrig mit dem sein können, was anderswo als archäisch bezeichnet wird, so kann diese Annahme auf einem Zirkelschluß beruhen. Da die archäischen Bildungen so alt sind, haben sie natürlich mehr Gebirgsfaltungen mitgemacht als die späteren Bildungen. Doch steht es nicht im Widerspruch mit dem, was man bis jetzt vom Archäicum kennt, daß die Granitintrusionen und Gebirgsfaltungen auch hier, was ihre Verbreitung betrifft, lokal gewesen sein können.

3. Gliederung und Einteilung. Da nun das Archäicum zum nicht unwesentlichen Teil aus umgewandelten Sedimentgesteinen mit eingelagerten Tuffen und Ergußgesteinen besteht, fragt es sich, ob man auch hier ihre ursprünglichen Lagerungsverhältnisse und ihre Altersfolge bestimmen kann. Im allgemeinen sind die archäischen Bildungen äußerst stark disloziert. Die Schichten sind zusammengefaltet, auseinandergezerrt, oft mit Graniten gemischt, innerhalb deren die sedimentären Gesteine häufig größere oder kleinere fragmentarische Gebiete bilden, und die Schichtenstellung ist meist ganz senkrecht.

Es ist klar, daß unter solchen Verhältnissen die Erforschung ihrer Stratigraphie immer sehr schwierig bleiben muß. Die meisten Einteilungsversuche für die archäischen Gesteine sind auf nunmehr als unrichtig erkannter Grundlage gemacht worden und besitzen daher nur historisches Interesse. Dieses gilt z. B. für die Einteilung des bayrischen Grundgebirges in eine „bojische"

Gneisformation und eine „herzynische“ Schieferformation.

An einigen besonders günstig gelegenen Stellen kann man jedoch konstatieren, daß auch im Archäicum große Diskordanzen in der Schichtenfolge vorkommen und vermag, von diesen ausgehend, die Sedimentformationen des Urgebirges voneinander abzutrennen und im einzelnen einzuteilen.

Dies ist besonders in gewissen Teilen Finnlands und des nördlichen Schweden der Fall. Man kann an solchen Stellen konstatieren, daß gewisse weit verbreitete Granite zur Unterlage einiger sedimentärer Schieferformationen gehören, während sie andere in Form von Adern und Gängen durchdringen. Die Ablagerungszeiten dieser verschiedenen archäischen Sedimente müssen also durch lange Zwischenperioden getrennt gewesen sein, während welcher erstere Zeit hatten, durch Gebirgsfaltungen in große Tiefen unter die Oberfläche gepreßt zu werden, wo granitische Maßen in sie eindrangen. Nach der Erstarrung der letzteren fand eine so tiefgreifende Abtragung statt, daß diese Granite an die Oberfläche kamen. Von der Grenze der einstmaligen Unterlage jeder Formation ausgehend, kann man die Schichtenfolge innerhalb der letzteren bestimmen. Hierbei stellt man fest, daß diese archäischen Sedimentformationen häufig eine bedeutende Mächtigkeit, bis einige 1000 m erreichen.

Im westlichen Finnland tritt besonders deutlich eine große Diskordanz hervor zwischen einem älteren Komplex, welcher neben granitischen Gneisen (dynamometamorphosierten Graniten) stark umgewandelte Sedimente (Glimmerschiefer, Quarzite usw.) sowie besonders feldspatreiche feinkörnige Schiefer, sogenannte Leptite umfaßt, die umgewandelte Ergussgesteine und ihre Tuffe sind und ferner auch Einlagerungen von kristallinem Kalkstein enthält, und den jüngeren sogenannten bottnischen Schiefern, welche am besten bei Tammerfors aufgeschlossen sind und aus metamorphosierten sandigen und tonigen Sedimenten, Konglomeraten, vulkanischen Ergußgesteinen und Tuffen bestehen. Die Gesamtmächtigkeit beträgt bis 5000 m. Die Leptite nebst zugehörigen Schiefern besitzen ihre Hauptverbreitung im mittleren Schweden, wo besonders Holmquist genaue Untersuchungen über ihre Genesis angestellt hat.

Ein großer Teil der mittelschwedischen Eisenerzvorkommen gehört zu dieser Formation. Aber auch den bottnischen ähnliche Schiefer und darunter, wie schon erwähnt, auch Konglomerate, kommen an vielen Stellen in Mittelschweden und bei Skellefteå in Norrland vor.

Im östlichen und nördlichen Finnland nimmt man auch eine Diskordanz an zwischen den älteren ladogischen Schiefern am Ladoga (Glimmer- und Hornblendeschiefer, Kalksteine, Quarzite usw.) und den jüngeren kalewischen Schiefern (umgewandelte Quarzsandsteine und Konglomerate, Metabasite, Phyltite usw.). Die Diskordanz ist jedoch nicht immer deutlich, offenbar weil die kalewischen Sedimente an vielen Stellen auf einer Unterlage von ladogischen Schiefern ähnlicher Zusammensetzung abgelagert wurden. Alle in diesen verschiedenen Formationen, welche große Mächtigkeiten besitzen, vorkommenden Schiefergesteine gehen da, wo sie mit Graniten in Berührung kommen, in migmatitische Gneise über.

Die kalewischen Schiefer sind sicher jünger als die bottnischen, da sie dem postbottnischen Granit aufgelagert sind, die ladogischen wahrscheinlich etwas älter als letztere.

Auch im Archäicum des mittleren Canada und der angrenzenden Teile der Vereinigten Staaten hat man eine aus superkrustalen Gesteinen bestehende Abteilung (Keewatin) unterschieden, die sowohl basische und sauere vulkanische Ergußgesteine und deren Tuffe, als auch Glimmerschiefer, Kalksteine, Quarzite, Grauwackenschiefer, Konglomerate und Brekzien enthält. Auch schichtige Eisenerze kommen in dieser Formation vor. Einige Schiefer sind kohlenführend. Coleman hält die normale Sedimentnatur dieser Schiefer für erwiesen. Von etwa demselben Alter sind die sogenannten Grenville- und Hastings-Serien des östlichen Canada, in welchen besonders Kalksteine eine große Mächtigkeit besitzen.

Der sedimentäre Teil des Keewatin ist auch (von Lawson) Coutchiching benannt worden.

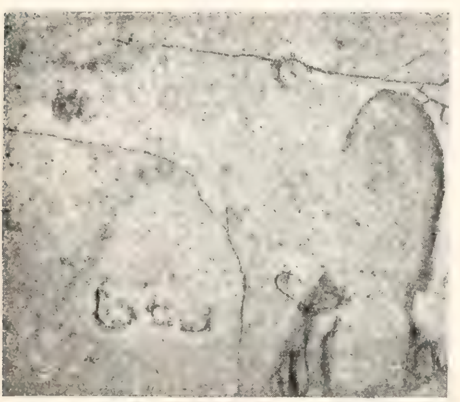
Die Grenville- und Hastings-Serien wurden früher in die sogenannte Laurentische Formation eingeschlossen. Jetzt werden aber hierzu hauptsächlich Granite, sowohl solche, welche die archäischen Schiefer durchdringen, als auch jüngere gerechnet; und dieser Begriff hat also jetzt keine chronologische Bedeutung mehr.

In Canada nahm man früher an, daß unter den superkrustalen Gesteinen des Archäicums vulkanische Ergußgesteine und Tuffe vorherrschten. Nach neueren Ansichten überwiegen aber unter ihnen metamorphosierte normale Sedimente. Dies ist auch im östlichen Teil von „Fennoskandia“ der Fall, während dagegen in Schweden vorwiegend sauere Ergußgesteine und deren Tuffe auftreten.

4. Fossilienführung. Nichts in der primären Beschaffenheit der archäischen Schiefer widerspricht der Annahme, daß zur Zeit ihrer Bildung Organismen hätten leben können.

Der reiche Kohlengehalt vieler archäischer Schiefer deutet auch an, daß organisches Leben schon damals existierte. Zwar kann ja Kohlenstoff auch auf anorganischem Wege entstehen, so daß Graphit bekanntlich gangförmig auftritt. In vielen Fällen tritt aber der Kohlenstoff der archäischen Schiefer als Zement ihrer klastischen Körner und in naher Verbindung mit den ursprünglichen Gemengteilen des Gesteins auf und dürfte dann ein organischer Detritus gewesen sein.

Das sogenannte Eozoon canadense ist nach Möbius' überzeugender Darstellung ein anorganisches Gebilde. Seine Entstehung durch Dislokationsprozesse und Auskristallisation neuer Minerale kann im einzelnen verfolgt werden. Bei Tammerfors in Finnland findet sich ein von Sederholm beschriebenes rätselhaftes Gebilde (sackförmige, durch kohlige Substanz markierte Figuren), für welches er eine wahrscheinlich organische Entstehung in Anspruch nimmt und das er Corycium enigmaticum benannt hat (Fig. 3). Es erinnert etwas an gewisse fossile Algen.



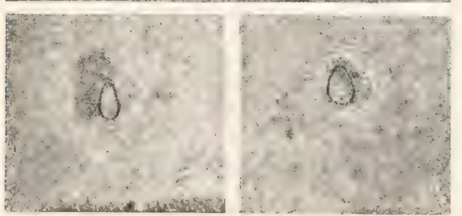


Fig. 3. Corycium enigmaticum in einem bottnischen Schiefer von Ajonokka. Messukylä. Finland. 2/9 der natürlichen Größe.

Wenn auch die fossile Natur dieser Gebilde zweifelhaft ist, so kann doch das Fehlen von Fossilien im Archäicum nicht als ein wesentliches Kennzeichen desselben angesehen werden, denn seine Gesteine sind in der Regel so stark umgewandelt, daß die etwa vorhanden gewesenen Fossilien zum größten Teil vernichtet worden sein müssen. Immerhin bleibt also die Möglichkeit bestehen, an ungewöhnlich gut erhaltenen Stellen Fossilien vorzufinden, Die Bezeichnung azoisch (frei von Organismen), welche früher ganz allgemein gebraucht wurde, darf daher nicht als Synonym für archäisch benutzt werden.

5. Das paläogeographische Alter der archäischen Gebiete. Man darf sich nicht vorstellen, die archäischen Gebiete müssten immer in paläogeographischer Beziehung sehr alt sein. Zwar gehören sie oft zu den resistenten Teilen der Erdkruste, welche während sehr langer Perioden Festland waren, in vielen Fällen sind sie jedoch im Laufe der geologischen Zeiträume zu wiederholten Malen vom Meer überschwemmt worden, das auf ihnen Sedimente verschiedenen Alters hinterließ, welche teilweise erst während der letzten geologischen Zeiträume fortdenudiert wurden.

So erhielt das hauptsächlich aus archäischen Gesteinen bestehende Gebiet in Nordeuropa erst in tertiärer Zeit seine jetzige Begrenzung und sein heutiges Relief, während es früher, ebenso wie das angrenzende russische Flachland, zum großen Teil von jüngeren Sedimentlagern bedeckt war.

Das große canadensisch-grönländische Gebiet archäischer Gesteine, das sogenannte Laurentia, scheint dagegen zum bedeutenden Teil nicht in postcambrischer Zeit von Meeressedimenten bedeckt gewesen zu sein. Dagegen wurde es wiederholt in präcambrischer Zeit von Meeren bespült, welche postarchäische („algonkische") Sedimente darauf ablagerten.

6. Verbreitung. Der Umstand, daß, wie schon erwähnt, ein großer Teil der kristallinen Gebiete, welche früher als typisches Archäicum angesehen wurden und ihrer Beschaffenheit nach mit letzterem übereinstimmen, später als jüngeren Alters erkannt wurde, ist einer genaueren Angabe seiner Verbreitung sehr hinderlich.

Die früher als klassisches Gebiet angesehene kristalline Formation in Sachsen wird ja jetzt von den dortigen Geologen als in paläozoischer Zeit entstanden aufgefaßt, und was einen großen Teil der übrigen, als Archäicum bezeichneten Gebiete in Zentraleuropa, besonders den Alpen betrifft, so muß ihr Alter als sehr ungewiß, in vielen Fällen sicher als postarchäisch angesehen werden. Besonders was die Gneisgebiete des Schwarzwaldes und der Vogesen betrifft, welche durch die darüber veröffentlichten klassischen petrographischen Untersuchungen berühmt geworden sind, so ist ihr archäisches Alter keineswegs sicher erwiesen.

Da wo die cambrischen Lager direkt die kristallinen Bildungen bedecken, läßt sich ihr Alter leichter bestimmen. So besteht ein Teil des kristallinen Untergrundes im

bayrisch-böhmischen Grenzgebirge aus Archäicum. Ebenso das Grundgebirge der Auvergne und ein Teil der übrigen kristallinen Gebiete in Frankreich und auf der iberischen Halbinsel.

In Sibirien und ganz Ostasien besitzt das Archäicum große Verbreitung und wird an verschiedenen Stellen von jüngeren präkambrischen und kambrischen Sedimentlagern bedeckt. Auch in Australien und Indien kann das archäische Alter eines großen Teiles der kristallinen Gebiete dieser Länder sicher bestimmt werden. Ebenso kommen in Afrika, sowohl im Süden des Landes, als auch innerhalb der weitausgedehnten Saharafläche große archäische Gebiete vor.

Die kristallinen Gebiete Südamerikas sind teilweise auch sicher archäisch, teilweise aber dem Alter nach nicht sicher bestimmbar.

Doch das größte Gebiet archäischer Gesteine (Laurentia) kommt in Nordamerika vor, erstreckt sich von Canada weiter nach NO und tritt auch in großen Teilen Grönlands auf.

Ein Gegenstück hierzu in kleinerem Maßstabe bildet das Urgebirgsterrain Nordeuropas Fennoskandia, wo jedoch neben archäischen Gesteinen auch jüngere präcambrische und paläozoische Gesteine in großer Verbreitung vorkommen.

7. Oekonomischer Wert. Erze. Die archäischen Gebiete, in deren Gesteinen der Kalkgehalt im allgemeinen niedrig ist und die im übrigen zum größeren Teil aus schwerlöslichen Mineralen bestehen, zeichnen sich gewöhnlich durch verhältnismäßig kargen Boden aus, umso mehr als viele dieser Gebiete auch vor nicht allzulanger Zeit von einer zusammenhängenden Eiskruste bedeckt gewesen sind, unter welcher steinige Moränenablagerungen sich abgesetzt haben. Die Granite dieser Gegenden zeigen oft bis an die Oberfläche hinauf eine seltene Frische, wodurch sie als Material für die Steinindustrie Wert bekommen. Dagegen mangelt es gewöhnlich in dieser Gegend an loseren Bausteinen. Die kristallinen Kalksteine besitzen große ökonomische Bedeutung, sowohl als Material für die chemische Industrie als auch für die Steinindustrie (Marmor). Von anderen wertvollen Mineralen im Archäicum sind weiter der Feldspat der Pegmatitgänge, der Apatit (Canada und Norwegen), Graphit und Asbest (besonders Canada) zu erwähnen.

Erze kommen in vielen anderen Gebieten reichlich vor. In Europa ist besonders Schweden berühmt wegen seines Reichtums an Erzen, von denen viele archäischen Alters sind. Dies gilt u. a. für die großen Vorkommen von Magneteisenerz bei Kirunavaara, Gellivaara usw. im schwedischen Lappland, sowie für Grängesberg, Dannemora und andere Eisenerzfelder im mittleren Schweden. Auch die Eisenerze von Arendal, Kragerö und Südvaranger in Norwegen gehören zum Archäicum, ferner eine Menge titanreiche Eisenerzvorkommnisse. Das gewaltige Kupferkiesvorkommen von Falun in Dalarne gehört auch zum Archäicum. Aus dieser Grube ist im Laufe der Zeiten Kupfer mit einem Geldwert von wenigstens einer Milliarde gefördert worden.

Nickelerze kommen bei Sudbury in Canada und an mehreren Stellen in Skandinavien vor. Die großen Eisenerzvorkommnisse der Adirondacks im Staate New York sind auch von archäischem Alter.

Das Urgebirge Canadas ist überhaupt sehr reich an Erzvorkommen, diese gehören aber im allgemeinen zum jüngeren Präcambrium, weshalb wir sie unter letzterer Rubrik schildern wollen. Ueberhaupt werden wir Veranlassung finden, auf verschiedene hier berührte Fragen zurückzukommen.

Literatur. ***Frank D. Adams,*** *On the Structure and Relations of the Laurentian System in Eastern Canada. Quart. Journal Geolog. Society of London May 1908 Vol. 64.* — ***Derselbe,*** *The Basis of Pre-Cambrian Correlation. Journal of Geology Bd. 17 2 Feb.-March 1909.* — ***A. P. Coleman,*** *Climate and Physical Conditions of the Keewatin. Journal of Geology Bd. 19 1 Jan.-Febr. 1911.* — ***Hermann, Credner*** *Genesis des sächs. Granulitgebirges. Renuntiationsprogramm. Leipzig 1906.* — ***C. Gäbert,*** *Die geologischen Verhältnisse des Erzgebirges. Das Erzgebirge. 1911.* — ***P. J. Holmquist,*** *The Archean Geology of the Coast-regions of Stockholm. Guides des Excursions en Suède du XI Congrès géol. intern. 1910.* — ***A. G. Högbom,*** *Precambrian Geology of Sweden. Bull Geol. Inst. Upsala X 1910.* — ***A. C. Lawson,*** *The Archean Geology of the Region northwest of Lake Superior. Études sur les schistes cristallins. Congrès géol. intern. 4 Session Londres 1888 S. 66.* — ***A. Michel-Lévy,*** *Sur l'origine des terrains cristallins primitifs. Ebenda S. 53.* — ***Möbius,*** *Der Bau des Eozoon Canadense. Paleontographica Bd. 28 1878 S. 175.* — ***H. Rosenbusch,*** *Zur Auffassung des Grundgebirges. N. Jahrb. f. Min. 1889 Bd. 2 S. 82.* — ***A. Sauer,*** *Ueber Conglomerate in der Glimmerschieferformation des sächs. Erzgebirges. Zeitschr. für ges. Naturwiss. Bd. 53 S. 706 Leipzig 1879.* — ***Derselbe,*** *Das alte Grundgebirge Deutschlands Compte rendu du IX. Congrès géol. intern. Vienne 1903 II S. 587.* — ***J. J. Sederholm,*** *Les roches préquaternaires de la Fennoscandia. Atlas de Finlande 1910 und Bulletin de la Commission géologique de Finlande Nr. 24.* — ***Derselbe,*** *Subdivision of the pre-Cambrian of Fenno-Scandia. Comptes rendus XI. Congres géol. intern. Stockholm 1910.* — ***Franz E. Suess,*** *Bau und Bild Oesterreichs. Wien und Leipzig 1903.* — ***A. E. Törnebohm,*** *Geologisk öfversiktskarta öfver Sveriges berggrund jemte upplysningar 1:500,000 Sveriges Geol. Und. Ser. Ba. 1910.* — ***C. R. van Hise und C. H. Leith,*** *Pre-Cambrian Geology of North America Bull. U. S. Geol. Survey Nr. 360.*

J. J. Sederholm.

Archimedes.

Griechischer Mathematiker und Physiker, lebte von 287 bis 212 v. Chr. in Syrakus. Er war der Sohn eines Astronomen, studierte in Alexandria. Die Geometrie verdankt ihm wichtige Sätze. Er wies nach, daß die Inhalte eines Kegels, einer Halbkugel und eines Zylinders von gleicher Höhe und Basis sich verhalten wie 1:2:3. Dieser Entdeckung maß Archimedes solche Wichtigkeit bei, daß auf seinen Wunsch eine von einem Zylinder umschriebene Halbkugel auf sein Grabmal gesetzt wurde; 137 Jahre später führte dieses Kennzeichen zur Auffindung des Grabes durch Cicero. Archimedes gab die mathematischen Grundlagen für die Statik fester und tropfbar flüssiger Körper und fand das Gesetz für das Gleichgewicht am Hebel auf. Am bekanntesten hat seinen Namen das durch ihn aufgestellte Gesetz des hydrostatischen Auftriebs (Archimedisches Prinzip) gemacht. Von dem ihm befreundeten König Hieron II. mit der Untersuchung betraut, wieviel Silber eine angeblich aus reinem Gold gefertigte Krone enthielt, grübelte er dieser Frage lange erfolglos nach, bis er beim Einsteigen in die gefüllte Badewanne auf dem richtigen Gedanken verfiel. Mit dem begeisterten Ruf „Heureka!" soll er unbekleidet durch die Straßen der Stadt nach Hause geeilt sein. Seine Entdeckungen hat Archimedes vielfach praktisch nutzbar gemacht. Die römische Flotte hatte zwei Jahre lang bei der Belagerung von Syrakus durch Archimedes' Kriegsmaschinen schwere Verluste zu erleiden; als endlich die Stadt von der Landseite überrumpelt wurde, kam der 75jährige Greis ums Leben; in seinem Hause mathematische Figuren in den Sand zeichnend wurde er von dem römischen Krieger Marcellus vorgefunden und, entgegen dem Befehl des Feldherrn, niedergestochen. Seine Wasserschraube verwertete er zur Bewässerung der Felder, durch den von ihm erfundenen Brennspiegel soll er feindliche Schiffe in Brand gesetzt haben; mittels eines Systems von Flaschenzügen bewegte er schwere Schiffe auf der Helling, welche Leistung ihn zu dem stolzen Ausspruch veranlaßte: Gib mir einen Standpunkt, und ich bewege die Erde! Auch die Sphära, ein Himmelsglobus, der durch Umdrehung einer Kurbel den Umlauf der Planeten um die Erde darstellt, ist sein Werk.

Literatur. *Bunte, Ueber Archimedes. Programm der Realschule in Leer. Ostern 1877. — J. L. Heiberg, Questiones Archimedeae. Kopenhagener Dissertation 1879.*

E. Drude.

Areschoug

Fredrik Wilhelm Christian.

Botaniker. Geboren am 9. Oktober 1830 in Simrishamer in Schonen, studierte von 1847 ab in Lund, hauptsächlich Botanik. 1854 habilitierte er sich daselbst. 1855 bereiste er Süd-Oesterreich. Nachdem er 1858 zum Adjunkten für Botanik ernannt war, arbeitete er 1860/61 bei H. v. Mohl in Tübingen, ein Aufenthalt, der von besonderem Einfluß auf ihn war. 1867 wurde er als Nachfolger von Agardt ordentlicher Professor in Lund, nahm 1878 seinen Abschied und starb am 21. Dezember 1908 daselbst. Er hat auf die Entwickelung der Botanik in Schweden bedeutenden Einfluß ausgeübt. Unter seinen Arbeiten sind zu nennen vor allem seine vergleichenden Untersuchungen über die Anatomie des Blattes, in der die verschiedenen Typen des Baues beschrieben, und die anatomische Struktur auf äußere Lebensbedingungen, besonders die Transpirationsverhältnisse, zurückgeführt wird. Aehnliche Tendenzen verfolgen auch u. a. seine Untersuchungen über den Blattbau der Mangrovepflanzen. Andere Arbeiten sind floristischer, systematischer (besonders über Rubus, worin über die Artentstehung ähnliche Anschauungen, wie in de Vries's Mutationstheorie, geäußert werden) und biologischer Natur.

Literatur. *Lidfors in Ber. d. deutsch. Bot. Gesellsch., Bd. 27, 1909, S. 47.*

A. Ruhland.

Argenterio

Giovanni.

1513 bis 1572. Er wurde in Castelnuovo bei Chieri in Piemont geboren, studierte in Turin Philosophie und Medizin, ließ sich 1538 als Arzt in Lyon nieder, war dann folgeweise in Antwerpen, seit 1544 in Pisa, Neapel, Rom, Mantua und zuletzt bis zu seinem Ableben in Turin als Professor der Medizin tätig. Argenterio gehörte in dem durch Paracelsus gegen Galen eingeleiteten Kampfe zu des letztgenannten schärfsten Gegnern. In der seit 1553 mehrfach aufgelegten Schrift In artem medicinalem Galeni commentarii tres nempe de corporibus, de signis et de causis salubribus wandte er sich besonders gegen die Galenische Lehre von den vier Kardinalsäften, die er durch eine einzige „Lebenskraft", die eingepflanzte Wärme, ersetzte. Außerdem wies er im Gegensatz zu Galen der Leber eine untergeordnete Rolle für die Ernährung zu und verlegte diese in das Blut. Uebrigens war Argenterio ein bei den Zeitgenossen durchaus geschätzter und anerkannter Praktiker trotz Haller, der ihn als einen „exosus practicus" bezeichnete.

Literatur. *Biogr. hervorr. Aerzte I 188.*

J. Pagel.

Aristoteles.

Geboren 384 v. Chr. zu Stagira (Stageiros) in Mazedonien; gestorben zu Chalkis auf Euböa. Er hat das Verdienst, Begründer der Zoologie als Wissenschaft zu sein. Er sammelte nicht nur zum ersten Male die bekannten biologischen Tatsachen, sondern verwertete sie auch durch eigene Beobachtungen und verband sie zu einem System. Die eigentlichen zoologischen Schriften des Aristoteles bilden nur einen kleinen Teil seiner

naturwissenschaftlichen Schriften überhaupt, aber sie sind so reich an Beobachtungsmaterial und systematisch so klar durchgearbeitet, daß sie bis ins 16. Jahrhundert hinein als unübertroffen zu gelten haben. In den zoologischen Werken des Aristoteles treten uns zum ersten Male nicht nur Zoologie, sondern auch allgemeine Biologie, Entwickelungsgeschichte, Teratologie und Physiologie, als systematisch entwickelte und auch nach dem Stand des damaligen Wissens ausgebaute Wissenschaft entgegen. Die Mängel der aristotelischen Schriften leiten sich hauptsächlich aus dem für die damalige Zeit erklärlichen Fehlen geeigneter Hilfsmittel, sowie aus der kritiklosen Verwertung von Einzelbeobachtungen her. Den Werken fehlt außerdem die letzte redaktionelle Ueberarbeitung. Gesamtwerke: Opera omnia lat. Venedig 1489; Opera omnia graece Venedig 1495/98. Davon zoologische Schriften: Historia animalium; De partibus animalium; De generatione animalium; De anima.

Literatur. **V. Carus,** *Geschichte der Zoologie, München 1872.* — **Lewes,** *Aristotel A chapter from the history of Science, London 1864. Deutsch von* **Carus.** — **J. B. Meyer,** *Aristoteles Tierkunde, Berlin 1853.*

W. Harms.

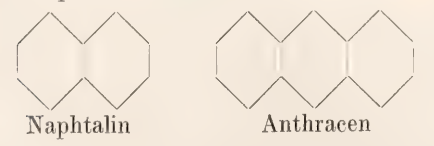
Aromatische Reihe.

1. Begriffsumgrenzung 2. Name 3. Charakteristische Reaktionen 4. Konstitution.

1. Begriffsumgrenzung. Man teilt die organische Chemie in zwei große Gruppen ein, die aliphatische und die aromatische Reihe. Im Gegensatz zu den aliphatischen Verbindungen, welche die Kohlenstoffatome in offener Kette aneinandergereiht enthalten, ist den aromatischen eine ringförmig geschlossene Struktur eigentümlich: ihre Grundsubstanz ist der Kohlenwasserstoff Benzol C_6H_6, dessen 6 Kohlenstoffatome unter sich zu einem Ringe verknüpft sind, wie es nachfolgende Figur andeutet

```
    //CH\
  CH     CH
  |      ||
  CH     CH
    \\CH/
```

Es können sich auch zwei oder mehr solcher Ringe zusammenlagern, wie z. B. im Naphtalin und Anthracen



Naphtalin Anthracen

Auch können sich außer Kohlenstoff andere Elemente an der Bildung des Rings beteiligen („heterocyclische Ringe")

```
    //CH\
  CH     CH
  |      ||          +
  CH     CH
    \\N/

   Pyridin         Chinolin
```

Endlich sind noch Ringe mit einer anderen Anzahl von Ringelementen bekannt

```
CH — CH     CH — CH     CH — CH
||    ||    ||    ||    ||    ||
CH    CH    CH    CH    CH    N
  \  /        \  /        \  /
   NH           S          NH
 Pyrrol      Thiophen     Pyrazol
```

Von sämtlichen derartigen Ringsystemen leiten sich zahlreiche Derivate ab; alle diese Verbindungen faßt man unter dem Namen „aromatische Reihe" im weitesten Sinne (vgl. den Artikel „Systematik und Nomenklatur der organischen Verbindungen") zusammen. Sie übertrifft an Zahl der bisher bekannt gewordenen Substanzen die aliphatische Reihe bei weitem.

2. Name. Der Name „aromatische Reihe" rührt daher, daß zufällig einige der zuerst erforschten Substanzen dieser Klasse einen aromatischen Geruch besaßen, eine Eigenschaft, die keineswegs allen Vertretern dieser Reihe zukommt; statt aromatische Verbindungen sagt man daher auch vielfach bezeichnender „cyklische Verbindungen".

3. Charakteristische Reaktionen. Die der aromatischen Reihe angehörenden Substanzen sind durch eine Anzahl charakteristischer Reaktionen von den aliphatischen scharf unterschieden. Dazu gehört in erster Linie ihr Verhalten gegen Salpetersäure und Schwefelsäure.

a) Während Methan und seine Homologen gegen Salpetersäure und Schwefelsäure sehr beständig sind, reagieren aromatische Substanzen lebhaft mit konzentrierter Salpetersäure unter Bildung sogenannter Nitrokörper, indem ein Wasserstoffatom des Kerns durch die Nitrogruppe ersetzt wird

$$C_6H_6 + HNO_3 = C_6H_5NO_2 + H_2O.$$

Aliphatische Nitrokörper können dagegen nur selten durch direkte Nitrierung und auch dann nur unter ganz anderen Bedingungen erhalten werden.

b) Auch mit konzentrierter Schwefelsäure reagieren aromatische Verbindungen leicht; es entstehen dabei unter Ersatz eines Wasserstoffatoms gegen die Sulfogruppe die Sulfosäuren

$$C_6H_6 + H_2SO_4 = C_6H_5SO_3H + H_2O.$$

Wie bei den Nitrokörpern der Stickstoff, so ist in den Sulfosäuren der Schwefel direkt, nicht etwa durch Vermittelung eines Sauerstoffatoms, an ein Ringkohlenstoffatom gebunden.

c) Die in den aromatischen „Kern“ eingetretenen, d. h. direkt an ein Kohlenstoffatom des Rings gebundenen Substituenten zeigen ein in mancher Hinsicht charakteristisches Verhalten. Während die Halogensubstitutionsprodukte der Fettkörper sich durch eine große Beweglichkeit, d. i. Reaktionsfähigkeit des Halogenatoms auszeichnen, gilt gerade das Gegenteil von den aromatischen Substanzen: Halogenatome, die in einem aromatischen Kern stehen, haften dort sehr fest und sind gar nicht oder nur sehr schwierig gegen andere Radikale, wie Amino-, Hydroxyl- oder Alkylrest, austauschbar.

d) Die Hydroxylverbindungen, die sogenannten Phenole, besitzen einen stärker sauren Charakter als die aliphatischen Alkohole, umgekehrt sind die aromatischen Amine schwächere Basen als die der Fettreihe.

e) Die Homologen des Benzols sind im Gegensatz zu den aliphatischen Kohlenwasserstoffen in der „Seitenkette“ leicht oxydierbar, indem diese in die Carboxylgruppe umgewandelt wird

C_2H_5 ⟶ COOH

4. Konstitution. Alle den aromatischen Verbindungen zugrunde liegenden Ringsysteme sind ungesättigt, d. h. sie sind imstande, noch mehr Wasserstoff aufzunehmen. So kann z. B. das Benzol durch Anlagerung von 6 Wasserstoffatomen in Hexamethylen übergeführt werden

CH
CH CH
CH CH
CH
$+ 6H =$
CH_2
CH_2 CH_2
CH_2 CH_2
CH_2.

Dabei verschwindet der aromatische Charakter, wie er in den oben angeführten Reaktionen zum Ausdruck kommt, vollständig; das Hexamethylen verhält sich durchaus wie ein aliphatischer Kohlenwasserstoff. Daraus folgt, daß der aromatische Charakter nicht durch das Vorhandensein des Rings bedingt wird, sondern in den eigentümlichen Bindungsverhältnissen des ungesättigten Ringsystems begründet ist, die an dem wichtigsten Vertreter, dem Benzol, erläutert sein mögen.

Das Benzol ist oben ohne nähere Erklärung als ein ringförmiges Gebilde hingestellt worden. Der Beweis für diese Anschauung folgt aus den Isomerieverhältnissen und Isomeriemöglichkeiten der Benzolsubstitutionsprodukte. Es läßt sich experimentell mit absoluter Sicherheit feststellen, daß es 1. nur ein einziges Monosubstitutionsprodukt des Benzols gibt; gleichgültig, welches von den 6 Wasserstoffatomen man auch immer substituiert, man kommt immer zum gleichen Produkt. Wir schließen daraus auf die Gleichwertigkeit der 6 Wasserstoffatome. Demnach bleiben für die Formel C_6H_6 nur drei Möglichkeiten übrig

I. $C_4(CH_3)_2$. II. $C_3(CH_2)_3$. III. $(CH)_6$.

Es läßt sich ferner beweisen, daß 2. die Disubstitutionsprodukte des Benzols stets in 3 Isomeren auftreten. Damit kommen, wie man leicht sieht, die Formeln I und II in Wegfall, denn beide vermögen nur je 2 Disubstitutionsprodukte zu liefern.

Ia. $C_4(CHX_2)(CH_3)$. Ib. $C_4(CH_2X)_2$.
IIa. $C_3(CH_2)_2(CX_2)$. IIb. $C_3(CHX)_2(CH_2)$.

Es bleibt also nur die dritte Formel übrig, wonach das Benzol aus 6 miteinander verbundenen CH-Gruppen besteht. Da die Wasserstoffatome vollständig gleichwertig sind, darf von den CH-Gruppen keine in ihrer Stellung irgendwie ausgezeichnet sein, es darf in der Formel keinen Anfang und kein Ende geben, d. h. die 6 Gruppen müssen unter sich zum Ring verbunden sein, sie bilden die Ecken eines regelmäßigen Sechsecks

CH
CH CH
CH CH
CH
oder schematisch

Den 3 isomeren Disubstitutionsprodukten kommen folgende Formeln zu:

X X | X X | X X ;

man unterscheidet sie als ortho- (o-), meta- (m-) und para- (p-) Derivate.

In den obigen Formeln sind nur 3 Valenzen jedes Kohlenstoffatoms berücksichtigt; über den Verbleib der 4. Valenz ist in ihnen noch nichts ausgesagt. Ueber die Art der Bindung dieser 4. Valenz im Benzolring sind zahlreiche Hypothesen aufgestellt worden, ohne daß es einer bis jetzt gelungen wäre, alle Reaktionen des Benzols restlos zu erklären. Die ersten eingehenden Spekulationen über die Konstitution des Benzolkerns stammen von Kekulé, und seine Benzolformel behauptet noch heute ihren Platz unter den Formeln, die die Wahrscheinlichkeit, ein Bild der Wirklichkeit zu geben, für sich haben. Kekulé nimmt an, daß die 6 Kohlenstoffatome im Benzolring abwechselnd einfach und doppelt gebunden sind, so daß sich folgendes Formelbild ergibt.

CH 1
CH6 2CH
CH5 3CH
4 CH

Jedes Kohlenstoffatom ist demnach mit 3 Valenzen wieder an Kohlenstoff gebunden und hat nur noch eine Valenz für Wasserstoff oder einen anderen Substituenten frei. Die nach dieser Formel vorauszusagenden Isomerieen entspre-

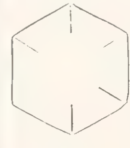
chen den oben aufgestellten Isomeriegesetzen, nur sollte es 2 verschiedene o-Disubstitutionsprodukte geben, da eine Verbindung, in der die Wasserstoffatome 1 und 2 substituiert sind, andere Eigenschaften zeigen sollte als eine andere, in der die Substitution an den Wasserstoffatomen 1. und 6. eingesetzt hat; denn in dem ersten Falle wären beide Radikale durch einfach gebundene, im zweiten Fall durch doppelt gebundene Kohlenstoffatome verknüpft. In der Tat haben sich aber sämtliche bisher gefundenen o-Derivate als identisch erwiesen. Kekulé begegnet diesem Widerspruch durch die Aufstellung der Oszillationstheorie, welche annimmt, daß jedes Kohlenstoffatom um eine Gleichgewichtslage derart hin- und herschwingt, daß die Doppelvalenz bald nach dem einen, bald nach dem anderen Kohlenstoffatom gerichtet ist. Noch ein anderer Einwand muß gegen Kekulés Formel geltend gemacht werden. Das Benzol und seine Derivate zeigen den Charakter völlig gesättigter Verbindungen, entfärben z. B. Kaliumpermanganat in sodaalkalischer Lösung nicht, was doch ein Kennzeichen sämtlicher ungesättigten, d. h. eine Doppelbildung enthaltender aliphatischer Substanzen ist. Man hat sich daher genötigt gesehen, im Benzol und natürlich überhaupt in allen aromatischen Ringsystemen eine besondere Art von Doppelbindungen anzunehmen und den gesättigten Charakter auf das eigentümlich in sich Geschlossene eines solchen Rings zurückzuführen. Neuerdings hat nun Thiele durch seine Theorie der Partialvalenzen der Kekuléschen Formel eine neue Stütze gegeben. Diese Theorie sagt in kurzen Worten folgendes: Wenn zwei Kohlenstoffatome untereinander doppelt gebunden sind, so werden die beiden Valenzen bei der Bindung nicht völlig aufgebraucht, sondern es bleibt an jedem Kohlenstoffatom noch ein Rest von freier Valenz übrig, welcher in den Formeln durch punktierte Linien angedeutet sei: —CH=CH—. Solche freie „Partialvalenz" macht die Kohlenstoffatome natürlich sehr geeignet, neue Verbindungen einzugehen, indem sie andere Radikale an sich reißen, addieren, die sich erst der Partialvalenz und dann der ganzen Valenz bemächtigen; das Vorhandensein solcher freien Partialvalenzen bedingt demnach den ungesättigten Charakter einer Verbindung. In dem Falle nun, daß zwei solcher doppelt gebundener Kohlenstoffpaare zusammentreten, sättigen sich zwei freie Partialvalenzen untereinander ab, so daß in einem solchen System „konjugierter Doppelbindungen" auch nur an zwei Kohlenstoffatomen Reste freier Valenz übrig sind, wie dies das nachfolgende Schema, in welchem die gegenseitige Absättigung zweier Partialvalenzen durch einen Bogen angedeutet ist, wiedergibt:

—CH CH—CH=CH—.

In der Tat verhält sich ein dieses System enthaltender Körper nicht wie eine doppelt, sondern wie eine einfach ungesättigte Substanz, indem zunächst nur an den zwei endständigen Kohlenstoffatomen Addition erfolgt. Betrachten wir nun den Benzolkern unter dem Gesichtspunkt dieser Theorie, so zeigt sich, daß in ihm 3 konjugierte Doppelbindungen enthalten sind, und zwar derart, daß sich sämtliche freien Partialvalenzen untereinander absättigen können, so daß das Benzol für Additionsreaktionen keinen Angriffspunkt mehr bietet, sich also wie ein gesättigter Körper verhalten muß.

Bei dieser Auffassung von der Konstitution des Sechsrings existiert kein Unterschied mehr zwischen „einfachen" und „doppelten" Bindungen im Ring; sämtliche Kohlenstoffatome sind an ihre beiden Nachbaratome völlig gleichartig gebunden, nämlich durch eine ganze und eine Partialvalenz. Es fällt mithin auch die Forderung der Existenz zweier isomerer o-Biderivate fort.

Neben der Kekuléschen Formel hat die sogenannte „Diagonalformel" des Benzols Bedeutung erlangt; sie vermeidet die Annahme von Doppelbindungen durch die Hypothese, daß je zwei im Ring sich gegenüberliegende Kohlenstoffatome durch eine Valenz verbunden sind, so daß sich nebenstehendes Schema ergibt. Diese Formel ist von Armstrong und Baeyer dahin abgeändert worden, daß über die 4. Valenz des Kohlenstoffs nichts weiter ausgesagt wird, als daß sie nach dem Innern des Benzolkerns gerichtet ist, während über die Art, wie sie dort gebunden ist, keinerlei feste Annahme gemacht wird. Doch läßt sich diese „zentrische" Formel ebenso wie die Diagonalformel nur sehr schwierig mit unseren räumlichen Anschauungen über die Richtung der Valenzen der Kohlenstoffatome in Einklang bringen.



Literatur. ***Kekulé,*** *Chemie der Benzolderivate. Erlangen 1867.* — ***Ladenburg,*** *Theorie der aromatischen Verbindungen. Braunschweig 1876.* — ***Thiele,*** *Theorie der ungesättigten und aromatischen Verbindungen. Liebigs Annalen 306 87 (1899).* — ***V. Meyer und P. Jacobson,*** *Lehrbuch der organischen Chemie. Leipzig 1902 bis 1911.*

Jakob Meisenheimer.

Artesische Brunnen

sind Quellen, welche erbohrt werden und dann selbsttätig springen. Die Ursache ist in einer muldenförmigen Lagerung der Schichten zu suchen. Die erste derartige Quelle wurde in der Landschaft Artois in Frankreich im 12. Jahrhundert erbohrt. Heute sind artesische Brunnen am meisten in Nordafrika verbreitet (siehe den Artikel „Quellen").

Arthropoda.

1. Morphologie. 2. Entwickelungsgeschichte. 3. Systematik. 4. Literatur.

1. Morphologie. Die über die ganze Erde in allen nur denkbaren Lebenslagen

verbreiteten, als Wasser-, Land- und Lufttiere, als freilebende, seßhafte oder schmarotzende Formen auftretenden, im Haushalte der Natur eine höchst wichtige Rolle spielenden Arthropoden oder Gliederfüßler (Kerbtiere, Kerfe) sind Tiere mit bilateral-symmetrischem, ungleichartig (heteronom) segmentiertem Körper und paarigen gegliederten Segmentanhängen oder Extremitäten. Zusammen mit den niederen Würmern (Scolecida), den Gliederwürmern (Annelida), den Weichtieren (Mollusca) und Kranzfühlern (Molluscoidea) gehören sie zu den Protostomia oder Zygoneura, bei denen der Mund des ausgebildeten Tieres auf den embryonalen Urmund zurückzuführen, der After dagegen sekundär am Körperhinterende entstanden zu denken ist. In den Grundzügen ihrer Organisation schließen sich die Arthropoden eng an die Anneliden an, mit denen sie vielfach als Articulata oder Gliedertiere zusammengefaßt werden.

Beide stimmen, abgesehen von der Gliederung des Körpers in eine Anzahl hintereinander gelegener Segmente, insbesondere auch in Lage und Bau des Nervensystems überein, das aus dem über dem Mundrohr gelegenen Gehirn und einer mit diesem durch zwei Schlundstränge verbundenen, ventral, d. h. unter dem Darmkanal gelagerten, ursprünglich mit den Segmenten korrespondierend gegliederten Ganglienkette besteht, deren Abschnitte indessen untereinander und mit dem Gehirn teilweise oder vollständig zu größeren Ganglienmassen verschmolzen sein können.

Der mit der stärkeren Chitinisierung ihrer Haut zusammenhängende Erwerb gegliederter, frei beweglicher Extremitäten oder Gliedmaßen schuf den Arthropoden eine vielseitige Bewegungsmöglichkeit, deren die Anneliden mit ihren plumpen Parapodien noch nicht befähigt sind. Während diese sich durch schlängelnde Bewegungen ihres Körpers kriechend oder schwimmend fortbewegen, bedienen sich die Vertreter der jüngeren Arthropodenreihen bei der Lokomotion ausschließlich der Extremitäten oder überdies noch besonderer Rückenanhänge (geflügelte Insekten). Indem des weiteren die Extremitäten verschiedener Körpersegmente verschiedenen besonderen Zwecken angepaßt oder teilweise rückgebildet wurden, kam es meist zur Sonderung mehrerer Körperabschnitte. Der vorderste oder Kopfabschnitt trägt außer den faden- oder scherenförmigen, vor der Mundöffnung stehenden Fühlern die entweder ausschließlich (Ringelkrebse, Tausendfüßler, Insekten) oder neben der Lokomotion (Cheliceraten, Pantopoden) der Nahrungsaufnahme dienenden Mundgliedmaßen (Gnathopoden), umfaßt deshalb im Gegensatz zu den Anneliden außer dem eigentlichen Kopfsegment stets noch einige der nächstfolgenden, miteinander verschmolzenen Segmente. Der Rumpf behält entweder seine ursprüngliche gleichartige Gliederung (Peripatiden, Tausendfüßler) oder zerfällt in einen beintragenden Brustabschnitt und einen der Beine entbehrenden Hinterleib (Phyllopoden, Insekten). Doch hat man sich die Sonderung dieser Leibesregionen in den verschiedenen Reihen der Arthropoden unabhängig entstanden zu denken, da sie eine verschiedene Zahl der Segmente aufzuweisen haben. Die beinlosen Körperringe zeigen im embryonalen Zustande meist noch Spuren der ehemals vorhandenen Gliedmaßen; auch durch Vergleich der ausgebildeten Tiere kann man eine fast lückenlose Reihe aufstellen, die von Formen mit wohlentwickelten zu jenen mit rückgebildeten Hinterleibsbeinen hinüberführt (Krebse, Insekten). Kopf- und Brustabschnitt (Cephalothorax der Schalenkrebse und mancher Blattfüßler), Brust und Hinterleib (viele Cheliceraten, maden- und schneckenförmige Insektenlarven) oder alle drei Leibesregionen (Milben, Pantopoden) können miteinander mehr oder weniger verschmolzen sein, so daß die ursprüngliche Gliederung des Arthropodenkörpers in den extremsten Fällen weitgehend verwischt wird.

Ein einzelner vollständiger Körperring besteht bei den Arthropoden ursprünglich aus einer Rückenplatte (Tergit), einer kleineren Bauchplatte (Sternum) und dem ventrolateral ansitzenden Extremitätenpaar, dessen Grundglieder (Subcoxen) nur selten (Pantopoden, manche Phyllopoden und Hexapoden) frei beweglich sind, vielmehr meist die sogenannten Seitenplatten (Pleuren) bilden. Wie die einzelnen Körperringe und Beinglieder sind auch die Segmentplatten durch weiche Zwischenhäute verbunden und gegeneinander verschiebbar, zeigen im besonderen aber eine große Veränderlichkeit. Sie können in Teilplättchen zerfallen oder ganz weichhäutig werden oder umgekehrt miteinander zu einem festen Panzer verschmelzen, mit dem die Gliedmaßen durch Scharnier- oder Rotationsgelenke beweglich verbunden sind.

Die Rückenplatten neigen vielfach zur Bildung oft weit vorspringender Randwülste, die an einzelnen Segmenten zu starren oder beweglichen, den übrigen Körper mehr oder weniger bedeckenden Schildern oder Schalen auswachsen können; auch die Flügel der Insekten sind auf solche Verbreiterungen der thorakalen Rückenplatten zurückzuführen.

Bei der Rückbildung der Gliedmaßen wird außer der bereits erwähnten Subcoxa auch die eigentliche Hüfte mehr oder weniger abgeflacht und verschmilzt meist mit dem Sternum zu einer einheitlichen Urosternalplatte, deren Zusammensetzung aus sternalen und Teilen der Extremi-

täten sich oft auch durch den Besitz paariger, sonst der Extremitätenbasis angehörender Anhänge, wie Hüftgriffel (Styli), Hüft- oder Bauchsäckchen, Kiemenlungen der Spinnentiere, vergleichend-morphologisch offenbart.

Die von der Hypodermis, der zelligen Körperhaut der Arthropoden, schichtenweise abgeschiedene Chitinhaut bleibt entweder elastisch oder erstarrt wie bei den Crustaceen und Progoneaten durch Aufnahme von Kalksalzen.

Die begrenzte Dehnbarkeit dieses Chitinkleides bringt es mit sich, daß das Wachstum der Arthropoden die wiederholte Bildung einer neuen größeren Haut erfordert, die während der „Häutung" durch Abstreifen der zuvor geplatzten alten Haut frei wird. Während viele Arthropoden sich vielmals und auch noch als geschlechtsreife Tiere häuten, haben andere eine Beschränkung der Häutungen, zumal nach Eintritt der Geschlechtsreife erfahren (Pterygoten).

Die Extremitäten lassen sich trotz der mannigfaltigsten Verschiedenheiten in ihrem Bau auf ein gemeinsames Grundschema zurückführen. Homolog mit den Parapodien der Anneliden, treten sie zunächst in Form geringelter, durch ein kompliziertes System von Ring- und Längsmuskelfasern allseitig beweglicher, an Stelle der Annelidenborsten mit beweglichen Krallen versehenen Beinstummel (Archipodien der Peripatiden) auf. Die Ausbildung bestimmter, meist durch verschieden orientierte Scharniergelenke miteinander verbundener Beinglieder und eines zweckmäßigen Systems von Beuge- und Streckmuskeln kennzeichnet die typischen Gliedmaßen der übrigen eigentlichen Arthropoden. In Uebereinstimmung mit den Parapodien der Anneliden kann bei den meisten Krebsen und einzelnen Vertretern anderer Arthropodenreihen (Limulus, Machilis, ? Ephemeridenlarven) die Extremität in einen dorsalen oder äußeren, meist kürzeren und nie typisch gegliederten Ast (Exopodit) und den Hauptstamm (Endopodit) geteilt sein (Spaltfuß). Die paarigen Kauwerkzeuge der Arthropoden lassen sich auf die Hüftglieder der Gnathopoden oder Teile derselben zurückführen, die paarigen äußeren Geschlechtsorgane auf Hüft- oder Endglieder der Gonopoden.

Die Körpermuskulatur bildet nur noch bei den Peripatiden einen kontinuierlichen Hautmuskelschlauch mit äußeren Ring- und inneren Diagonalfasern; die innerhalb dieser Muskelschicht gelagerte Längsmuskulatur zeigt wie die Muskulatur der übrigen Arthropoden auch bei Peripatus eine Auflösung in einzelne Muskelgruppen. Die Muskelfasern sind mit seltenen Ausnahmen (Peripatiden) quergestreift; im Kopfabschnitt können sie zu einer zwischen Oesophagus und Unterschlundganglion liegenden sehnigen Platte differenziert sein (Entosternum der Cheliceraten); zur besseren Befestigung am Chitinskelett bildet dieses nicht selten Einstülpungen, die zu einem komplizierten System (dem Entoskelett) verbunden sein können.

Das den Anneliden noch zukommende Wimperepithel haben die Arthropoden verloren. Die bei den Anneliden mit der Leibeshöhle durch einen Wimpertrichter frei kommunizierenden segmentalen Exkretionsorgane (Nephridien) sind bei ihnen am inneren Ende geschlossen und mit einem drüsigen bläschen- oder schlauchförmigen Endabschnitt ausgestattet, aber meist nur noch in wenigen Paaren entwickelt (Fühler- und Schalendrüse der Krebse; Coxaldrüse der Spinnentiere) oder ganz rückgebildet, bisweilen anderen Funktionen (z. B. als Speichel- oder Spinndrüsen) angepaßt. Auch die Geschlechtsdrüsen (Ovarien und Hoden) sind gegen die Leibeshöhle abgegrenzt und mit ihren Ausführungsgängen (ebenfalls umgewandelten Exkretionsorganen) in dauernde Verbindung getreten.

Die erste indifferente Anlage der Geschlechtsorgane läßt sich vielfach bereits in ganz jungen embryonalen Stadien nachweisen und ist schon wiederholt auf eine oder zwei Furchungszellen zurückgeführt worden. Der Anlage nach sind die Geschlechtsorgane stets paarig und behalten ihre paarige Natur vollständig oder doch in gewissen Teilen bei. Verwachsungen zu unpaarigen Abschnitten treten am häufigsten im Bereiche der Ausführungsgänge auf, seltener betreffen sie die keimbereitenden Organe selbst. Diese sind in Gestalt einfacher oder mehrästiger, selten netzartig verzweigter (Skorpione) Schläuche entwickelt und lassen bisweilen noch eine segmentale Gliederung erkennen (manche Krebse und Insekten). Die Eibildung erfolgt an der ganzen Oberfläche der Ovarien oder in besonderen Kammern (Endkammer der Insekten-Eiröhren, Eibläschen der Arachniden). Sehr verbreitet sind verschiedenen Bestimmungen dienende Anhangsdrüsen der inneren (mesodermalen) und Blindsäcke der äußeren (ektodermalen) Ausführungswege. Die paarige oder (meist) unpaare Geschlechtsöffnung liegt in der Regel ventral (selten, wie bei gewissen niederen Krebsen, ist sie auf die Dorsalseite verschoben) und gehört sehr verschiedenen Körpersegmenten an.

Wie die vordersten Extremitäten z. T. in den Dienst der Nahrungsaufnahme getreten sind, so können die den Segmenten der Geschlechtsöffnung angehörenden Extremitäten in einem oder mehreren Paaren den Zwecken der Kopulation oder Eiablage mehr oder weniger weitgehend angepaßt sein; selten dienen andere Extremitäten (Maxillartaster der männlichen echten Spinnen, vordere Abdominalfüße der männlichen Libelluliden) als Kopulationsorgane.

Die Spermatozoen der Arthro-

poden sind bei den Insekten, den Chilopoden, Peripatiden und Limulus frei beweglich und langgeschwänzt, bei den anderen Arthropoden herrschen unbewegliche, bisweilen abenteuerlich gestaltete Formen vor, die man als Spermatosome bezeichnet; weit verbreitet ist die Uebertragung des Spermas durch Spermatophoren. Die meist dotterreichen Eier werden frühzeitig im Ovarium, Eileiter oder Uterus mit einer chitinähnlichen Hülle bekleidet und sind deshalb mit bisweilen kompliziert gebautem Mikropylenapparat versehen; die Gestalt der Eier ist sehr verschieden, nicht selten sind sie mit Anhängen versehen oder gestielt oder zu mehreren in Kokons oder Gallerthüllen eingeschlossen. Ihre Entwickelung erfolgt meist außerhalb des Muttertieres; doch kommen vivipare Formen unter den Arachniden, Opisthogoneaten und Peripatiden vor. Während sich hier die Eier in den Eiröhren oder im Uterus ohne spätere plazentale Nahrungszufuhr entwickeln, kommt es bei einzelnen Peripatus-Arten sogar zur Bildung von Plazenta und Nabelstrang. Bei Krebsen werden die Eier häufig in Eiersäckchen herumgetragen oder in Bruträumen entwickelt, die durch blattartige Anhänge der Extremitäten oder durch das Rückenschild gebildet werden. Auch die ihre Eier ablegenden Arthropoden üben häufig eine sich in der verschiedensten Weise äußernde Brutpflege aus, die bei den Insekten vereinzelt (Termiten und Hymenopteren) zur Entwickelung der biologisch hochstehenden „Tierstaaten" geführt hat. Neben der normalen Amphigenese ist die parthenogenetische Entwickelung der Eier keine Seltenheit.

Die meist geräumige Leibeshöhle der Arthropoden verdankt ihre Entstehung einer Verschmelzung der primären (blastocölen) mit der sekundären (cölomatischen) Leibeshöhle, eine Eigentümlichkeit, auf die auch der Bau des Blutgefäßsystems zurückzuführen ist. Dieses besteht nicht wie bei den Anneliden aus geschlossenen Blutbahnen, stellt vielmehr ein offenes Gefäßsystem vor. In den typischen Fällen wird das Blut aus dem über dem Darmkanal in einem gesonderten Teil der Leibeshöhle (dem Perikardialsinus oderHerzvorraum) gelegenen, schlauchförmigen und mit mehreren Spaltöffnungen (Ostien) versehenen Herzen durch arterielle Bahnen in den ventralen Teil der Leibeshöhle und zu den Kiemen oder Lungen getrieben und gelangt durch venöse Bahnen zunächst in den Perikardialsinus und schließlich zum Herzen zurück. Meist fehlen besondere arterielle und venöse Gefäße, bisweilen, besonders bei kleinen Formen, fehlt sogar das Herz.

Die Atmung wird nur bei kleinen und zarthäutigen Arthropoden ausschließlich durch die Haut vermittelt. Die größeren Formen atmen entweder durch Kiemen, die als sack-, schlauch- oder blattartige, bisweilen aus- und einstülpbare Anhänge der Extremitätenbasis, selten des Enddarmes (Libellenlarven) auftreten oder umgewandelten Extremitäten entsprechen (so vornehmlich bei den Wasserbewohnern); oder sie besitzen wie die Landbewohner und die von solchen abzuleitenden Wasserbewohner innere röhrenförmige, einfache oder verzweigte und meist anastomosierende Atmungsorgane, Tracheen, die durch feine, meist paarige, Oeffnungen (Stigmen) mit der Außenluft in Verbindung stehen. Bei manchen Formen, (gewissen Spinnen, Insekten und Tausendfüßlern) sind gleichzeitig Kiemen oder diesen gleichwertige Lungen und Tracheen entwickelt. Während bei der Kiemenatmung das Blut den Atmungsorganen zuströmt, suchen bei der zuletzt genannten Atmungsweise die Tracheen die mit Sauerstoff zu versorgenden Organe auf und erfüllen den Körper häufig mit einem dichten Netzwerk feiner Luftkanäle. Diese Tracheen bilden sich entweder an den verschiedensten Stellen der Körperoberfläche (Peripatiden), oder sie zeigen paarweise eine bestimmte segmentale Anordnung und eine der den Kiemen vergleichbare Beziehung zu der Basis der Extremitäten, so daß sie gewissermaßen als eingestülpte Kiemen interpretiert werden können. Bei den Spinnentieren läßt sich die Umwandlung der zunächst in Lungen umgebildeten eingestülpten Kiemen in Tracheen vergleichend-morphologisch mit großer Wahrscheinlichkeit nachweisen; es folgt daraus zugleich, daß der Besitz von Tracheen kein Maßstab für die Verwandtschaft ihrer Träger sein kann, wenn die übrige Organisation eine solche unwahrscheinlich macht (vgl. die Beziehungen der Spinnentiere zu den Insekten).

Der Darmkanal zieht wie bei den Anneliden frei durch die Leibeshöhle; er ist nur selten bei parasitären (Rhizocephalen) oder solchen geschlechtsreifen Formen rückgebildet oder funktionsuntüchtig, die entweder eine freie larvale Entwickelungszeit durchlaufen (Cocciden) oder von dem aus dem Ei übernommenen Dottervorrat zehren, ohne je selbständig Nahrung aufzunehmen (Sexuales vieler Blattläuse; Zwergmännchen der Rankenfüßler). Die Mundöffnung ist im Kopfabschnitt, der After am Ende des Körpers gelegen, seltener erscheint jene bis hinter die vordersten Rumpf- oder Brustbeine gerückt (Pflanzenläuse) oder ist die Verbindung von Mittel- und Enddarm unterbrochen oder der Enddarm rückgebildet (Phylloxeren und Larven anderer Insekten wie Bienen, Pupiparen, Ameisenlöwe). In der

einfachsten Fällen ist der Darmtraktus in eine enge Speiseröhre (Oesophagus), den der Nahrungsresorption dienenden Magen oder Mitteldarm und den stark muskulösen Enddarm (Rektum) gegliedert (Peripatiden, Phyllopoden, Collembolen). Häufiger indessen bilden Mittel- oder Enddarm oder beide Abschnitte Blindsäcke oder -schläuche, die zum Teil einer gesteigerten Assimilation (Leberschläuche bei Spinnentieren, Schalenkrebsen und geradflügeligen Insekten), zum Teil einer Unterstützung oder dem Ersatz der segmentalen Exkretionsorgane (Malpighische Gefäße der Spinnentiere, Ringelkrebse, Tausendfüßler und Insekten) dienen. Auch können einem Kropf- oder Kaumagen entsprechende Darmabschnitte sowie ein Dünndarm differenziert sein. Als Speicheldrüsen funktionieren entweder besondere, bestimmten Segmenten der Mundgliedmaßen angehörende, bisweilen sehr umfangreiche, umgewandelte Nephridien (Tausendfüßler, Insekten) oder besondere in der Umgebung der Mundöffnung ausmündende Hautdrüsen (Spinnentiere). In der Nähe des Afters münden bisweilen noch Rektal- und Analdrüsen, die zum Teil übelriechende oder ätzende Flüssigkeiten oder Gase absondern und für die Verteidigung von Wichtigkeit sind (Insekten, Geißelskorpione).

Bindegewebe ist im Körper der Arthropoden allgemein verbreitet und spielt als Fettkörper beim Stoffwechsel eine größere oder geringere Rolle; er enthält häufig Fetttropfen und Proteinkörner, oft außerdem Harnsäurekristalle. Bindegewebiger Natur sind auch die Bekleidungen der Blutbahnen, ferner gewisse Leuchtorgane und die sogenannten Blutgewebe.

Sinnesorgane und Drüsen hypodermalen Ursprunges sind bei den Arthropoden allgemein verbreitet. Drüsen können über die Körperoberfläche zerstreut oder in mehreren oder wenigen Paaren als Bauch- und Beindrüsen eine segmentale Anordnung zeigen; solche sind morphologisch mit den Spinn- und Borstendrüsen der Anneliden zu vergleichen und zum Teil mit exkretorischen Funktionen ausgestattet; auch manche Giftdrüsen und Spinndrüsen sind den Hautdrüsen zuzuzählen.

Von Sinnesorganen sind Tast-, Geruchs- und Sehapparate allermeist entwickelt. Die Körperhaare können der Tast- und Geruchsfunktion angepaßt sein; Riechhaare finden sich besonders an den Fühlern und Mundgliedmaßen, hier zugleich dem Geschmack dienend, ausgebildet. Manche in eigenartige Hautgrübchen eingesenkte feine Haare werden als Hörhaare angesprochen (besonders bei Spinnen, vgl. den Artikel „Arachnoidea"). In gewissen grubenartigen, seltener bläschenartig geschlossenen Einsenkungen der Chitinhaut (Hörgruben und Hörbläschen der Schalenkrebse) vermitteln sie die durch den Druck von Otholithen erzeugten statischen Reize. In die Sinneshaare treten Nervenfasern direkt oder unter Zwischenschaltung einer Ganglienzelle ein. Komplizierter gebaute chordotonale und tympanale, als Gehörorgane gedeutete Sinnesorgane treten bei den Insekten auf.

Die Augen der Arthropoden treten entweder in Gestalt von Blasenaugen auf oder sie sind auf Napf- oder Becheraugen zurückzuführen. Die Peripatiden, die in so vielen Merkmalen annelidenähnlich organisiert sind, stehen auch im Bau der Augen allen anderen Arthropoden gegenüber; ihr einfaches mit einer inneren Linse versehenes Blasenauge erinnert lebhaft an die Augen der polychäten Alciopiden. Inverse Blasenaugen mit kutikularer Linse sind die bei den Cheliceraten vorkommenden Mittel- oder Hauptaugen, mit denen das auf niederer Entwickelungsstufe stehen gebliebene oder rudimentäre Stirnauge (Naupliusauge) der niederen Krebse, niederen Insekten und Pantopodenlarven homologisiert wird. Vom Typus der Napf- oder Becheraugen sind die Seitenaugen der Antennaten und Cheliceraten, die durch Verschmelzung oder Anhäufung mehr oder weniger zahlreicher Einzelaugen (Ommatidien) oder durch Ueberkippung der embryonalen Augenbecher sehr komplizierte Strukturverhältnisse darbieten können; am bekanntesten sind sie in Gestalt der Facettenaugen der Krebse und Insekten.

Tonerzeugende Apparate sind bei Landarthropoden (besonders bei Insekten) in blattförmigen (inneren) Anhängen der Tracheenmündungen und in rauhen gegeneinander reibbaren Hautstellen gefunden worden. Die Männchen der Singcikaden besitzen am 1. Hinterleibsring ein Paar elastischer, durch starke Muskeln bewegter Trommelhäute, manche Insekten bringen durch rasche Flügelschläge Töne hervor.

Die Arthropoden sind in der Regel getrennt geschlechtlich, nur in seltenen Fällen, bei Krebsen mit festsitzender (Cirripedien) oder parasitischer (Cymothoiden) Lebensweise sind sie normal, gelegentlich auch sonst in einzelnen abnormen Individuen zwittrig. Gewisse Cirripedien besitzen außer zwittrigen Individuen auch Zwergmännchen einfachster Bauart; andere Arten sind rein weiblich mit Zwergmännchen; wieder andere ausschließlich zwittrig. Die Trennung der Geschlechter hat hier einen hohen Grad des sexuellen Dimorphismus gezeitigt; weniger auffällig sind Männchen und Weibchen bei den meisten Arthropoden unterschieden, doch beschränkt sich in

einigen Gruppen der Unterschied auf die inneren und äußeren Geschlechtsorgane. Neben Arthropoden mit gleichartiger Generationsfolge gibt es andere, bei denen verschiedenartige Generationen einander ablösen. Bleiben alle Generationen zweigeschlechtlich und sind sie an verschiedene Jahreszeiten gebunden, so spricht man von Saisondimorphismus. Entbehren einzelne Generationen der Männchen, indem sich die Weibchen parthenogenetisch fortpflanzen, so kommt es zur Heterogonie, einer besonderen Form des Generationswechsels. Bei manchen heterogenetischen Arthropoden werden die Männchen nur noch in einer einzigen, der sexuellen (besser bisexuellen) Generation ausgebildet (Phyllopoden, Aphiden); bei einzelnen Arten hat man seither sogar vergeblich nach Männchen gesucht; sie alle gehören in die Verwandtschaft parazyklischer Formen, bei denen neben dem heterogenetischen Hauptzyklus rein parthenogenetische Nebenzyklen bestehen, die untereinander in bestimmter Weise zusammenhängen. Bei den parasitischen Pflanzenläusen wird die parazyklische Heterogonie noch durch fakultativen oder obligatorischen Wirtswechsel kompliziert.

Im Gegensatz zu den heterogenetischen Arthropoden mit beschränkten Männchen stehen andere mit Doppelmännchen (Anisopoden). Formen mit zwei oder mehr weiblichen, gestaltlich verschiedenen Individuen, die als fruchtbare und begattungsfähige „Königinnen“ und nicht begattungsfähige und oft ganz unfruchtbare „Arbeiter“ unterschieden werden, sind unter den staatenbildenden Insekten (Termiten, Ameisen, Bienen, Wespen) wohlbekannt.

Die Geschlechtsreife tritt in der Regel erst im formvollendeten Endstadium ein; selten sind neotenische (Cocciden-Weibchen) und pädogenetische (Cecidomyiden) Arthropoden.

2. Entwickelungsgeschichte. Die Entwickelung der Arthropoden ist im allgemeinen durch eine postembryonale Metamorphose ausgezeichnet. Die aus dem Ei ausschlüpfenden Jugendformen sind teils armsegmentiert (oligomer) und wachsen unter allmählicher Neubildung von Segmenten heran, teils besitzen sie bereits die für die Reifeform typische Segmentzahl und sind dann holomer; dementsprechend vollzieht sich das Wachstum bei jenen im Rahmen der Anamorphose, bei diesen im Rahmen der Holomorphose (Holomerie). In beiden Fällen können die bereits ausgebildeten Körperteile der Jugendform denen der Reifeform ähnlich oder mehr oder weniger erheblich modifiziert sein. Den Erwachsenen ähnliche, imaginiforme Jugendformen zeigen ein einzielig auf das Reifestadium gerichtetes, epimorphes, die abweichend organisierten Jugendformen ein metamorphes Wachstum. Epimorphe Arthropoden finden wir unter Arachniden, Arthrostraken, Chilopoden und den niederen, primär oder sekundär flügellosen Insekten; zugleich epi- und anamorphe unter den Progoneaten, Chilopoden und Insekten (Proturen); einzig stehen die angeblich orthoplastischen Thermitoxeniden da, die das Ei als Imago verlassen. Die Metamorphose der Arthropoden ist anamorph oder holomorph. Jene ist allgemein bei den Crustaceen, diese bei den Hexapoden und Cheliceraten verbreitet. Beide Verwandlungsarten können mit primären (phyletischen, palingenetischen) oder mit sekundären (cänogenetischen) Jugendformen oder Larven beginnen. Indessen ist meistens der archaistische Charakter der Primärlarven mehr oder weniger modifiziert. Die Larve als solche ist auch bei den Arthropoden als ein phyletisches Produkt im Sinne des biogenetischen Grundgesetzes aufzufassen, so beispielsweise die primär flügellose und in dieser Hinsicht apterygotenartige Jugendform der geflügelten Insekten oder die sogenannte Trilobitenlarve der Limuliden, und die sekundären Larven der Arthropoden sind letzten Endes auf derartige Primärlarven zurückzuführen. Das Studium der Arthropodenlarven bietet die interessantesten Wechselbeziehungen zwischen dem durch die Gesetze der Vererbung in bestimmten Entwickelungsrichtungen festgehaltenen Organismus und seinen äußeren Lebensbedingungen, insbesondere ist auch der rückwirkende Einfluß des Reifestadiums auf die Jugendformen wiederholt zur Geltung und Fixierung gelangt (darmloser Nauplius der Rhizocephalen) und hat bei holomorphen Formen im Sinne epigenetischer Entwickelung nicht selten eine Epimorphie der wichtigsten Organsysteme (archimetabole Insekten, Thelyphoniden) oder der Gesamtorganisation (die streng epimorphen Arthropoden) erreicht. So wird auch die Nauplius-Larve der Crustaceen als eine mit Crustaceen-Merkmalen epigenetisch ausgestattete Anneliden-Trochophora aufgefaßt, die in der Pantopodenlarve gleichfalls in epigenetischer Richtung abermals modifiziert worden ist. Die Metamorphose selbst kann bei parasitären Formen einen scheinbar regressiven und durch Auftreten von Ruhestadien, die keine Nahrung aufnehmen und mehr oder weniger tiefgreifende Umwandlungsprozesse der inneren Organe durch Histolyse und Regeneration erleiden (holometabole Insekten, Cirripedien), einen diskontinuierlichen Charakter annehmen.

Die Embryonalentwicklung der Arthropoden hat wichtige spezifische

Erscheinungen aufzuweisen, die die Einheitlichkeit dieses Tierkreises darzutun geeignet sind. Der meist in Menge vorhandene Nahrungsdotter bewirkt eine zu dem für die Arthropoden typischen einschichtigen Blastoderm führende superfizielle Eifurchung, die im Hinblick auf die Entwickelung mancher Krebse aus der totalen und äqualen Furchung abzuleiten ist. Die Keimblätterbildung beginnt mit einer Invagination oder Zelleneinwucherung auf der ventralen Seite des Eies, derart, daß der Blastoporus oder sein vorderes Ende zur späteren Mundöffnung wird. Die Anlage des Mesoderms ist allermeist vielzellig und auf Bildung seitlicher Divertikel des Urdarms oder auf Wucherungen am Rande des Blastoporus zurückzuführen; diese paarige Mesodermanlage zerfällt frühzeitig in Ursegmente, die in der Regel zu Cölomsäcken differenziert werden, deren Bildung nur bei den Crustaceen fast völlig unterdrückt wird. Die Cölomhöhle der Ursegmente wird indessen nicht zur definitiven Leibeshöhle, da die Ursegmente — nach Abschnürung der für die Bildung des Herzens, der Nephridien oder der aus solchen abzuleitenden Organe (wie Speicheldrüsen, Analdrüsen, Ausführungsgänge der Genitaldrüsen) und der Genitaldrüsen bestimmten Zellen — einen teilweisen Zerfall erleiden, in die primäre Leibeshöhle einwandern und ein mesenchymatisches Gewebe liefern. In diesem Mesenchym entsteht die definitive Leibeshöhle durch Auftreten von später zusammenfließenden Hohlräumen. Als letzter Rest der Ursegmente wird das für die Arthropoden charakteristische, die Leibeshöhle in einen dorsalen, das Herz enthaltenden perikardialen und einen ventralen Hohlraum teilende Perikardialseptum angesehen, während die Genitalhöhle in den ursprünglichen Fällen, wie sie die Peripatiden und Myriopoden noch heute zeigen, in Uebereinstimmung mit den Anneliden als Rest der Cölomhöhle interpretiert wird.

Im allgemeinen wird bei den Arthropoden zuerst die ventrale Seite des Embryos in Form eines Keimstreifens angelegt, dessen vorderes Ende sich frühzeitig zum embryonalen Kopflappen verbreitert; erst später dehnt er sich über die anfangs von dünnen Zellschichten bedeckten seitlichen und dorsalen Teile des Eies aus oder er wird zunächst unter gleichzeitiger Bildung von Embryonalhüllen als invaginierter oder überwachsener Keimstreif ins Innere des Eies verlagert (Skorpione, Insekten, Peripatus). Das Ektoderm des Keimstreifens liefert die Anlage des Nervensystems durch Einsenkung eines mittleren und zweier seitlicher Zellstränge, welche frühzeitig in Segmente zerfallen; an der Bildung des Gehirns nehmen außerdem paarige Einstülpungen teil, die als Scheitelgruben angelegt werden und bei der Bildung der optischen Ganglien und der Mittelaugen der Cheliceraten und wohl auch der Stirnaugen der übrigen Arthropoden von Bedeutung sind. Ektodermaler Herkunft sind bei den Arthropoden auch der Vorder- und Enddarm, während der Mitteldarm entweder aus entodermalen Zellen oder, wie bei den Opisthogoneaten, aus Wucherungen des ektodermalen Stomo- und Proctodaeums entsteht, indem in diesem Falle das nur aus Dotterzellen bestehende Entoderm abortiert. Der Nahrungsdotter verbleibt bei Bildung des Mitteldarms nicht selten teilweise in der Leibeshöhle und wird dann von Mesodermzellen dicht umlagert und durchwachsen, in der Regel wird er aber auf verschiedenem Wege durch Resorption oder Umwachsung in den Mitteldarm aufgenommen. Als Ersatz der nephridialen Exkretionsorgane entstehen die Malpighischen Gefäße bei den Arachniden als entodermale, bei den Tracheaten (Antennaten) als ektodermale Darmblindsäcke. Die Extremitäten treten zu beiden Seiten des Keimstreifens als ektodermale Ausstülpungen auf, in die sich die Cölomsäckchen oder Wucherungen der Ursegmente hineinstrecken.

Der Anlage des Keimstreifens entsprechend ist die äußere Gestaltung des Embryos erst vollendet, wenn der Rückenschluß der einander entgegenwachsenden Seitenteile der Embryonalanlage erfolgt ist. Bei den mit Embryonalhüllen versehenen Arthropodenembryonen wird dieser Vorgang durch einen Einrollungsprozeß der Embryonalhüllen, dem bei den Formen mit eingestülptem Keimstreif dessen Ausrollung vorangeht, kompliziert. Haben die embryonalen Organe des Embryos eine der Jugendform entsprechende Weiterentwicklung rücksichtlich ihrer Struktur und Lagerung erfahren, so beginnt mit dem Verlassen des Eies (oder bei viviparen Formen des Muttertieres) die postembryonale Entwicklung des Tieres, deren Grundzüge bereits oben dargelegt sind. Erwähnt sei noch, daß bereits im Ei Häutungsprozesse erfolgen können, wie sie im allgemeinen (Ausnahmen nur bei den Termitoxeniden [Dipteren]) für das postembryonale Wachstum charakteristisch sind.

3. Systematik. Die in den vorstehenden Zeilen in gedrängtester Kürze angedeuteten morphologischen und entwickelungsgeschichtlichen Verhältnisse der Arthropoden gestatten heutzutage die Aufstellung folgender Hauptgruppen.

Die früher allgemein zu den Arthropoden gerechneten Tardigrada (Moos- oder Bärentierchen) haben in diesem System keine Aufnahme mehr gefunden, da ihnen das Hauptmerkmal der Arthropoden, der Besitz echter,

Extremitäten homologer Mundwerkzeuge, fehlt; ihre den Borsten der Anneliden-Parapodien gleichwertigen Krallen, der bei Würmern (Nematoden, Anneliden) weitverbreitete muskulöse ei- oder kugelförmige Pharynx, die ebenfalls für gewisse Würmer (Nematoden-Männchen) typische Kloakenbildung und die glatte, nicht quergestreifte Muskulatur beweisen die Wurmnatur der Tardigraden. Die ähnlich problematischen Linguatulida (Zungenwürmer) dürften hingegen parasitisch veränderte Arthropoden sein und bleiben vorläufig als Anhang der Arachnoideen aufgeführt (vgl. den Artikel „Arachnoidea"). Es genügt der Hinweis auf die eigenartigen ersten Larvenformen gewisser polymetaboler Schlupfwespen oder derfreilebenden Gallmilben (Eriophyiden), um bei Annahme neotenischer Differenzierung die Möglichkeit der Entstehung der Linguatuliden aus typischen Arthropodenformen wahrscheinlich zu machen.

Arthropoda oder Gliederfüßler. Annulaten oder Gliedertiere mit echten Mundextremitäten, Nephridien (oft veränderter Funktion) und Genitalorgane gegen die Leibeshöhle abgekapselt.

1. Hauptstamm Archipodiata (Onychophora) oder Wurmfüßler. 3 Paar Kopfextremitäten (Antennen, Kiefer, Oralpapillen). Zahlreiche Nephridien. Zwei weit getrennte durch viele Querkommissuren verbundene ventrale Nervenstränge. Hautmuskelschlauch noch neben isolierten Muskelbündeln vorhanden, Muskelfasern in der Hauptmasse glatt. Blasenaugen. Ringelbeine; Fußkrallen mit eigener direkter Muskulatur. Nicht-segmentale Tracheen. Frei bewegliche Spermatozoen.

Nur die I. monotypische Hauptklasse der Protracheata mit der Familie der Peripatidae.

2. Hauptstamm Arthropodiata oder Gelenkfüßler. 5 bis 7 Paar Kopfextremitäten oder deren Segmente. Nephridien nur in wenigen Segmenten vorhanden und meist mit veränderter Funktion. Ventrale Nervenstränge meist genähert oder verschmolzen. Die segmentalen Ganglien meist nur durch eine Querkommissur verbunden. Nur isolierte Muskelbündel oder daneben Reste des Hautmuskelschlauches, Muskelfasern stets quergestreift. Napfaugen und invertierte Blasenaugen. Gliederbeine; Fußkrallen (wenn differenziert) mit indirekter Muskulatur. Hautatmung oder solche durch segmentale Kiemen oder Tracheen.

1. Unterstamm Antennata oder fühlertragende Gliederfüßler. 1 oder 2 Paar (seltener ganz reduzierte) primär fadenförmige, dem Tast- und Riechsinn dienende Antennen. Ursprünglich 4 Paar Mundgliedmaßen im engeren Sinne. Lokomotion in erster Linie durch Rumpfgliedmaßen. Die invertierten Mittelaugen rudimentär oder rückgebildet zugunsten der nicht invertierten Seitenaugen, diese typisch als multikorneale Fazettenaugen. Fußkrallen (wenn vorhanden) nur mit Flexormuskeln. Eibildung nicht in traubigen Follikeln.

II. Hauptklasse Branchiata (Teleiocerata) oder kiemenatmende fühlertragende Gliederfüßler. 2. Metamer des Körpers Extremitäten (2 Antennen, Pedipalpen) tragend. Atmung durch die Haut oder Kiemenanhänge der Extremitätenbasis. Extremitäten mit Ausnahme des 1. Antennenpaares ursprünglich mit dorsalem (oder Außen-) Anhang (Spaltfuß), der indessen in manchen Gruppen nur an einzelnen Beinpaaren erhalten bleibt. Mandibeln ursprünglich und meist mit Taster (Bein-Telopodit). Kopf und Brustabschnitt meist zu einem Cephalothorax verschmolzen, seltener ein für sich isolierter Kopfabschnitt ausgebildet (Trilobiten, Anomo- und Arthrostraken). Nephridiale Exkretionsorgane (Schalen- und Antennendrüse), die selten rückgebildet und durch Darmdivertikel (Malpighische Gefäße) ersetzt sind (Arthrostraken). Genitalöffnung im mittleren Körperabschnitt. Chitinpanzer durch Aufnahme von Kalksalzen mehr oder weniger erstarrt. Postembryonalentwickelung meist durch Anamorphose, oft mit aberranten Larvenformen, von denen bei niederen Krebsen der Nauplius typisch ist. Spermatozoen meist in Form unbeweglicher Spermatosome.

1. Klasse Trilobita oder Trilobiten. Paläozoische Branchiaten mit Kopfschild, einer wechselnden Zahl freier Rumpfsegmente und einem aus der Verwachsung mehrerer Segmente hervorgegangenen Schwanzschild (Pygidium). Nur 1, neuerdings mit dem 2. Antennenpaar der Crustaceen homologisiertes, Antennenpaar, hinter diesem 4 Paar Gnathopoden mit breiten coxalen Kauladen. Meist sind große Facettenaugen vorhanden.

Die im Cambrium bereits in vielen Familien und Gattungen vertretenen Trilobiten starben gegen Ende des Paläozoikums aus. Morphologisch stehen sie den Crustaceen nahe, weisen aber zugleich unverkennbare Beziehungen zu den Gigantostraken auf; hier sei in dieser Hinsicht nur an das larvale Trilobitenstadium der Limuliden und daran erinnert, daß die 4 auf die Antennen folgenden Extremitätenpaare angeblich als Gnathopoden mit wohlerhaltenen Telopoditen entwickelt sind.

2. Klasse Crustacea oder Krebstiere. Branchiaten mit (ursprünglich 2 Antennenpaaren und 3 (oder 4) Paaren echter, ausschließlich der Nahrungsaufnahme (nicht zugleich der Lokomotion) dienender Gnathopoden, deren 1. Paar zur Mandibel differenziert ist.

1. Unterklasse Entomostraca. Krebstiere mit wechselnder Zahl der Rumpfsegmente, diejenigen des Körperhinterendes oft ohne Extremitäten. Neben den verbreiteten Facettenaugen bleibt beim erwachsenen Tier das unpaare Stirnauge (Naupliusauge) erhalten. Ein Kaumagen fehlt. Die stets anamorphe Metamorphose beginnt mit dem Naupliusstadium. Meist kleinere, oft parasitisch stark umgebildete Formen, die 5 stark differenten Ordnungen angehören.

2. Unterklasse Malacostraca. Krebstiere mit konstanter Segmentzahl; nur das Telson als Endsegment (selten [bei Nebalia] auch das vorletzte) extremitätenlos. Facettenaugen fast stets vorhanden, das unpaare Stirnauge im Reifestadium rudimentär oder fehlend. Kaumagen stets ausgebildet. Die vordersten Brustgliedmaßen oft als Maxillarfüße der Nahrungsaufnahme angepaßt. Postembryonalentwicklung meist anamorph, doch kommt das Naupliusstadium nur noch selten vor; einzelne Formen (Arthrostraken) sind epimorph. Oft große, meist freilebende Formen, die man auf mehrere Legionen und Ordnungen verteilt.

III. Hauptklasse Tracheata (Atelocerata) oder tracheenatmende fühlertragende Gliederfüßler. 2. Metamer des Körpers (Prämandibularsegment) rudimentär, extremitätenlos. Atmung allermeist durch Tracheen, selten ausschließlich durch die Haut oder gleichzeitig durch kiemenartige Anhänge. Spaltfußbildung sehr selten (Apterygoten). Mandibeln stets ohne Taster. Kopf meist vom Rumpf getrennt. Nephridialorgane nur noch mit geänderter Funktion (Speichel-, Spinndrüsen) vorhanden. Malpighische Gefäße als Nierenorgane meist vorhanden.

1. Klasse Progoneata. Paarige (seltener unpaare [Symphylen]) Geschlechtsöffnungen in einem der vorderen (2. bis 4.) Rumpfsegmente. Laufbeine stets mit einem dem Coxalgelenk gleich gelagerten, meist bicondylischen Trochanterofemoralgelenk und nur durch Flexormuskeln bewegten tibiotarsalen Gliedern. Rumpfgliederung homonom. Spermatozoen wie bei den Branchiata (vgl. auch den Artikel „Myriopoda").

1. Unterklasse Diplopoda. Extremitäten des labialen (letzten) Kopfsegmentes rückgebildet, Maxillen zum Gnathochilarium differenziert. Rumpfsegmente mit Ausnahme des 1. (Pauropoden) oder der ersten 5 (Diplopoden) und des Endsegmentes mit je 2 Paar Extremitäten, auch in anderen Eigenschaften (Ganglien, Stigmen) Doppelsegmenten entsprechend. Cerci fehlen. 9 bis über 100 Laufbeinpaare. Erstes anamorphes Larvenstadium mit 3 Paar Laufbeinen. 2 Ordnungen mit zahlreichen Familien.

2. Unterklasse Symphyla. Labiale Extremitäten in sehr spezialisierter Form vorhanden. Rumpfsegmente mit je 1 Beinpaar. Cerci vorhanden, mit Spinndrüsen. 12 Laufbeinpaare. — Eine formenarme Ordnung.

2. Klasse Opisthogoneata. In der Regel unpaare (seltener paarige [Ephemeriden]) Geschlechtsöffnung in einem der präanalen Rumpfsegmente. Laufbeine meist mit einem nahezu vertikal zum Coxalgelenk gelagerten (syndetischen) Trochanterofemoralgelenk. Labiale und die anderen Mundextremitäten (wenigstens vorübergehend) postembryonal entwickelt. Cerci bei den ursprünglichen Formen stets vorhanden. Spermatozoen meist frei beweglich und geschwänzt (vgl. auch die Artikel „Myriopoda" und „Insecta").

3. Unterklasse Chilopoda. Rumpfsegmentierung homonom, 15 bis 173 beintragende Rumpfsegmente. Entwickelung anamorph, hemianamorph, selten epimorph. Extremitäten des 1. Rumpfsegmentes als Giftfüße dem Kopfe angegliedert (falls die Homologie der Mundbeine nicht etwa in der Reihenfolge Mandibeln, Maxillulen, Maxillen, Labiopoden [Giftfüße] erwiesen wird). Genitalöffnung im präanalen Segment. Beine mit nur durch Flexormuskeln bewegten tibiotarsalen Gliedern. Vier auf 2 Ordnungen verteilte Familien.

4. Unterklasse Hexapoda oder Insekten. Rumpfsegmentierung bei geschlechtsreifen Tieren (Imagines) stets heteronom; drei mit gegliederten Beinen versehene Brust- und nicht über 12, mit rudimentären oder zu Cercis differenzierten Extremitäten versehene oder beinlose Hinterleibssegmente. Entwickelung meist epimorph oder durch Metamorphose, selten (Proturen) anamorph. Keine labialen oder prothorakalen Giftfüße. Genitalöffnung im präanalen oder einem der nächstvorhergehenden Segmente. Beine am Grunde des tibiotarsalen Abschnittes meist mit Flexor- und Extensormuskeln. Die jüngeren Vertreter der Gruppe mit tergalen Flügelanhängen an Meso- und Metathorax, in diesen Fällen die Jugendstadien primär flügellose (apterygotoide), oft sekundär modifizierte Larven. Zahlreiche auf 2 Legionen verteilte Ordnungen und Familien.

2. Unterstamm Chelicerata oder scherenfühlertragende Gliederfüßler. 1 Paar, primär scherentragende, bei der Nahrungsaufnahme als Greif- oder Stechwerkzeuge beteiligte, selten bei geschlechtsreifen Tieren rückgebildete (Pantopoden) Cheliceren anstatt der 1. Antennen der Antennata. Lokomotion ausschließlich

durch Kopfgliedmaßen, diese sämtlich oder in einigen Paaren mit coxalen Kauladen, selten Mundöffnung frei, und die Extremitäten ohne Kauladen (Pantopoden, Palpigraden, Solpugiden). Die invertierten Mittelaugen meist als Hauptaugen entwickelt und oft allein erhalten. Fußkrallen (wenn vorhanden) mit Flexor- und Extensormuskeln. Eibildung meist in traubigen Follikeln der Ovarien. Nephridiale Exkretionsorgane allein oder neben Malpighischen Gefäßen vorhanden.

IV. Hauptklasse Euchelicerata oder rumpftragende scherenfühlertragende Gliederfüßler. Kopfabschnitt ursprünglich mit 6 Extremitätenpaaren, mit einheitlichem, selten gegliedertem Rückenschild. Extremitäten ohne subcoxales Beinglied. Rumpf stets wohlentwickelt. Genitalöffnungen primär im 2. Rumpfsegment, bei Formen mit verschmolzenem Kopf-Rumpfabschnitt (Opilioniden, Acariden, Linguatuliden) wohl auch sekundär oralwärts verschoben.

1. Klasse Merostomata (Palaeostraca) oder Schwertschwänzler. Die 5 hinteren cephalen Extremitätenpaare mit coxalen Kauladen. Rumpf stets vom Kopfe getrennt mit freien oder auf dem Rücken verwachsenen Segmenten, deren vordere 5 (oder 6) blattartig verbreiterte (aus Hüftgliedern mit verkümmerten Telopoditen bestehende), freie, auf der Hinterseite kiementragende Extremitäten besitzen. Telson schwertartig. Geschlechtsöffnungen paarig auf der Hinterseite der Extremitäten des 2. Rumpfsegmentes. Spermatozoen lang geschwänzt und beweglich. Meist sehr große, vorwiegend paläozoische, auf zwei Ordnungen oder Unterklassen zu verteilende Meerestiere, von denen nur die Familie der Limuliden noch rezent vorkommt.

2. Klasse Arachnida oder Spinnentiere. Höchstens noch 3 cephale Extremitätenpaare (des 1. bis 3. postoralen Segmentes) mit coxalen Kauladen. Rumpf vom Kopf getrennt oder mit ihm verschmolzen, seine vorderen Segmente mit rudimentären Extremitäten oder ohne solche. Atmung durch eingestülpte Kiemenlungen oder Tracheen, selten ausschließlich durch die Haut. Telson in Gestalt eines Giftstachels oder geißelförmig oder (meist) rückgebildet. Geschlechtsöffnung unpaar, primär wie bei den Merostomata gelagert. Spermatozoen meist in Form unbeweglicher Spermatosome. Große bis sehr kleine, vielgestaltige, bisweilen durch Parasitismus deformierte (Linguatuliden), auf 2 Unterklassen, mehrere Ordnungen und zahlreiche Familien verteilte, meist landlebige oder Süßwasser bewohnende Gliederfüßler.

V. Hauptklasse Pantopoda oder Asselspinnen. Kopfabschnitt ursprünglich mit 7 Extremitätenpaaren. Extremitäten mit frei beweglichen Subcoxalgliedern. Rumpf stets klein, stummelförmig, beinlos. Genitalöffnungen paarig, im ♀ Geschlecht meist an den 4, im ♂ an den 2 oder 3 letzten Beinpaaren im Coxalgliede (d. h. dem 2. Gliede) gelegen. Darm- und Genitalblindsäcke sich tief in die Extremitäten hineinerstreckend. Nur eine formenarme Klasse bildende, ausschließlich im Meere lebende, meist nur mäßig große, der Atmungsorgane entbehrende Cheliceraten.

Literatur. *Da die wichtigste neuzeitliche Literatur der Arthropoden bei den einzelnen Klassen derselben angegeben wird, sei hier bei dem Mangel eines modernen Handbuchs der Arthropodenkunde auf die drei wichtigsten deutsch-sprachlichen Lehrbücher verwiesen:* ***A. Lang,*** *Lehrbuch der vergleichenden Anatomie der wirbellosen Tiere, 1. Aufl., Bd. II (1894); 2. Aufl. in Vorbereitung. Jena. —* ***E. Korschelt und K. Heider,*** *Lehrbuch der vergleichenden Entwicklungsgeschichte der wirbellosen Tiere, 1. Aufl., 2. Heft des speziellen Teiles (1892). Jena. —* ***Claus-Grobben,*** *Lehrbuch der Zoologie, 2. Aufl. (1910). Marburg. — Ueber die Gestaltung der modernen Arthropoden-Phylogenie lese man ferner nach in* ***R. Heymons,*** *Die Entwicklungsgeschichte der Scolopender. Zoologica, Heft 33 (1901) und* ***C. Börner,*** *Neue Homologieen zwischen Crustaceen und Hexapoden usw. Zoologischer Anzeiger, 34. Bd., S. 100 bis 125 (1909).*

C. Börner.

Arzneipflanzen

siehe den Artikel „Heil- und Giftpflanzen“.

Asterismus

ist die Eigentümlichkeit mancher Mineralien im auffallenden oder durchfallenden Lichte eine regelmäßige, meist sternförmige Verzerrung einer Lichtquelle hervorzubringen. Die Ursache sind Aetzfiguren (vgl. den Artikel „Aetzfiguren“) oder sonstige regelmäßige Unebenheiten des Kristalls oder regelmäßige Einlagerungen, an denen eine Beugung des Lichtes stattfindet (siehe den Artikel „Lichtbeugung“).

Astronomische Ortsbestimmungen.

Erläuterung der benutzten und allgemein gebräuchlichen Bezeichnungen. 1. Allgemeine Erläuterungen. 2. Methoden zur Bestimmung der geographischen Breite eines Erdortes: a) Größte und kleinste Zenitdistanz eines Gestirnes. b) Sonnenhöhen zur Zeit der Solstitien. c) Meridianzenitdistanzen. d) Horrebow-Talcott-Methode (Differenzen von Meridianzenitdistanzen). e) Zirkummeridianzenit-

distanzen. f) Zenitdistanzen polnaher Sterne; besonders des Polarsterns (α Ursae minoris). g) Methode der „gleichen Höhen". h) Beobachtungen der Durchgänge von Gestirnen durch den „Ersten Vertikal" bei geringer Zenitdistanz. i) Beobachtungen der größten Digressionen und sogenannte absolute Methoden. k) Beobachtungen von Gestirnen im Norden und Süden und im Osten und Westen in paarweise gleichen Höhen. 3. Methoden zu Zeit- und geographischen Längenbestimmungen: a) Allgemeine Erläuterungen: Zeitrechnung, Uhrstand und Uhrgang. Nullmeridian. Zeitbestimmung. b) Gleichzeitige Beobachtung cölestischer Phänomene; Meteore, Mondfinsternis. c) Beobachtung irdischer Erscheinungen; Lichtsignale. d) Bestimmung der Längendifferenz mit Hilfe des elektrischen Telegraphen: „Persönliche Gleichung". e) Zeitübertragung. f) Beobachtungen des Mondes: α) Mondrektaszensionen. β) Sternbedeckungen. γ) Monddistanzen. δ) Mondzenitdistanzen. 4. Einzelne Methoden der Ortsbestimmung zu speziellen Zwecken: a) Ortsbestimmungen auf See. Standlinien-Methoden. b) Anwendung der Photographie zu astronomischen Ortsbestimmungen: α) zu Breitenbestimmungen. β) zu Längenbestimmungen.

Erläuterung der benutzten und allgemein gebräuchlichen Bezeichnungen.

AR oder α = Rektaszension oder Gerade-Aufsteigung eines Gestirnes. Das ist der Winkel, den der durch das Gestirn gelegte Stundenkreis mit dem einschließt, der durch den Frühlingsanfangspunkt geht.

D oder δ = Deklination oder Abweichung eines Gestirnes. Das ist der Winkel, den die Visierrichtung nach dem Gestirn vom Erdmittelpunkt aus gerechnet mit ihrer senkrechten Projektion auf die Aequatorial-Ebene einschließt.

p = Poldistanz eines Gestirns ($\delta + p = 90^0$).

φ = Geographische Breite eines Erdortes.

φ' = Geozentrische Breite

λ = Geographische Länge

$\Delta\lambda$ = Längendifferenz zweier Orte.

Z = Zenitdistanz; Z^0 Meridianzenitdistanz } ($Z + h = 90^0$)

h = Höhe über dem Horizont }

U = Uhrangabe zu der eine Beobachtung erfolgt ist.

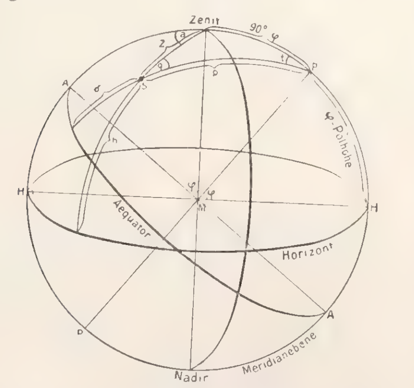


Fig. 1. Uebersicht der gebräuchlichen Bezeichnungen in der sphärischen Astronomie.

Δu = Korrektion der benutzten Uhr auf richtige Zeitangaben (einerlei ob eine Sternzeit oder eine Mittlere Zeit-Uhr benutzt ist, vgl. S. 562).

δu = Tägliche Aenderung der Uhrkorrektion (Uhrgang).

ϑ = Sternzeit für einen gegebenen Moment.

t = Stundenwinkel eines Gestirns. Das ist der Winkel den der durch das Gestirn gelegte

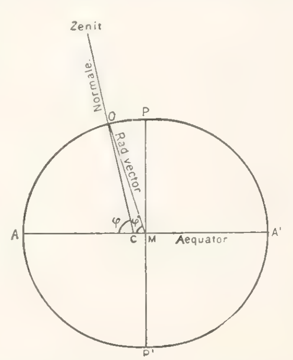


Fig. 2. Geographische und Geozentrische Breite

$$\operatorname{tg}\varphi' = \frac{b^2}{a^2}\operatorname{tg}\varphi$$

Stundenkreis im gegebenen Moment mit dem Meridian einschließt. Das ist die Zeit, welche bereits verstrichen ist, seit das Gestirn den Meridian passierte (t positiv), oder die es noch gebraucht (t negativ), um in den Meridian zu gelangen. Es ist immer $\vartheta = \alpha + t$.

a = Azimut eines Gestirns. Der Winkel, welchen ein durch das Gestirn gelegter Höhenkreis (Vertikalkreis) mit dem Meridian einschließt, gemessen durch den Winkel am Zenit oder als Bogen im Horizont gezählt vom Süd- oder Nordpunkt (a_s oder a_n) desselben.

1. Allgemeine Erläuterungen. Unter astronomischen Ortbestimmungen versteht man im allgemeinen die Festlegung eines Ortes auf der Erde nach seinen geographischen Koordinaten (geographische Breite und Länge) mit Hilfe astronomischer Beobachtungen, d. h. Messungen der Position der Gestirne relativ zu der durch die Normale am betreffenden Erdort definierten Ebene des Horizontes.

Die Beziehungen, die zwischen der Lage dieser Ebene und den bekannten Orten der Gestirne für einen gegebenen Moment bestehen und die mit Hilfe winkelmessender Instrumente gewonnen werden können, gestatten auf Grund der Prinzipien der sphärischen Trigonometrie die Bestimmung der geographischen Breite und der Ortszeit. Das Resultat der letzten verglichen mit der gleichzeitig gültigen an einem anderen Ort liefert die zwischen beiden Orten bestehende Differenz der geographischen Längen. Würde man als Vergleichsort den wählen, durch den man sich den konventionell festgesetzten Nullmeridian hindurchgehend denkt, so wäre die erhaltene Längendifferenz sogleich die geographische Länge bezogen auf diesen

Nullmeridian. Als Orte, von denen aus man die Längen zählt, pflegt man gegenwärtig solche mit festen Observatorien zu wählen (Greenwich, Paris, Berlin usw.), während früher andere Gründe maßgebend waren, der Meridian von Ferro z. B. sollte der sein, der nach Westen die damals bekannte zivilisierte Welt begrenzte. Für die geographische Breite ist eine solche konventionelle Wahl des Ausgangsparallels nicht nötig, da der Äquator unter allen Parallelen eine exzeptionelle Stelle einnimmt, indem er der größte Kreis ist, der auf der Rotationsaxe senkrecht steht, also von den beiden Polen der Erde gleich weit absteht.

In gewisser Beziehung gehört zu den astronomischen Ortsbestimmungen auch die Aufsuchung des Punktes der Horizontebene, in dem diese von dem Meridian des Beobachtungsortes geschnitten wird. Auf diesen Punkt bezieht man die Richtungen im Horizont, also der sogenannten Azimute, der Visierlinien nach anderen, der direkten Beobachtung zugänglichen, oder auch vom Ausgangspunkt nicht sichtbaren Orten der Erde (vgl. den Artikel „Richtungen"). Ist das Azimut zweier Orte bezogen auf einen dritten, sowie die Entfernung beider Orte (gemessen im größten Kreis oder in der geodätischen Linie) bekannt, so lassen sich aus den bekannten geographischen Koordinaten des einen Ortes, die des anderen berechnen (Geodätische Übertragung).

Es ist theoretisch möglich, die Zeit und die geographische Breite für einen gegebenen Ort jedes unabhängig von dem andern zu bestimmen, aber in beiden Fällen sind dazu Methoden erforderlich, die sich in der Praxis nur unter bestimmten Voraussetzungen anwenden lassen und nicht die schärfsten Resultate gewähren. Deshalb pflegt man tatsächlich so vorzugehen, daß man beide Elemente gemeinsam bestimmt, oder für die Erlangung des einen eine wenn zunächst auch nur genäherte Kenntnis des anderen voraussetzt. Durch wechselweise Annäherung gelangt man dann zu der nötigen Schärfe der Angaben für beide Koordinaten.

2. Methoden zur Bestimmung der geographischen Breite eines Erdortes. Die geographische Breite eines Ortes kann auf sehr verschiedene Art bestimmt werden. Man wählt die Methoden aus, einmal nach ihrer größeren oder geringeren Unabhängigkeit von der Kenntnis anderer dazu nötigen Elemente (Zeit und Koordinaten des benutzten Gestirnes), dann nach der zu erlangenden Genauigkeit und weiterhin nach den am Erdorte vorhandenen Ausführungsmöglichkeiten (klimatische Verhältnisse, zur Verfügung stehende Instrumente usw.).

2a) Größte und kleinste Zenitdistanz eines Gestirnes. Die geographische Breite läßt sich finden aus der Beobachtung der größten und kleinsten Zenitdistanz oder Höhe, die ein sogenannter Zirkumpolarstern im Laufe seiner scheinbaren täglichen Bewegung erlangt. Es ist klar, daß die der geographischen Breite (φ) entsprechende Erhebung des Himmelspoles über den Horizont (Polhöhe) gleich ist dem Mittel der beiden gemessenen Höhen $\frac{1}{2}(h_o + h_u) = 90^0 - \frac{1}{2}(Z_u + Z_o) = \varphi$ wo h_o die größte und h_u die kleinste Höhe, und Z_u die größte und Z_o die kleinste Zenitdistanz bedeutet. Die beiden Höhen oder Zenitdistanzen werden im Meridian erreicht, falls es sich um Fixsterne handelt. Die Kenntnis der Position des Gestirnes ist also nicht nötig für die Erlangung des Wertes der Polhöhe. Allerdings ist die Beobachtung der größten und kleinsten Höhe bei Unkenntnis der Lage des Meridians nicht mit großer Schärfe möglich, da man dann den Moment der Umkehr des Gestirnes abzuwarten gezwungen ist.

Kennt man aber die Lage des Meridians, d. h. kann man ein zur Höhen- (oder Zenitdistanz)-Messung geeignetes Instrument so aufstellen, daß das Gestirn im Moment seines Meridiandurchganges (seiner Kulmination), die Absehenslinie passiert und dabei eingestellt werden kann, so ist diese Methode von großer Bedeutung und ergibt in ihrer vollständigen Durchbildung äußerst genaue Resultate.

Man wählt dann besonders helle Sterne, die den Polen nahe stehen — auf der nördlichen Halbkugel den Polarstern — die man auch bei Tage in einigermaßen großen Fernrohren sehen kann. Dann ist es möglich, regelmäßig die aufeinanderfolgenden oberen und unteren Kulminationen zu beobachten und diese wieder so zu verteilen, daß das Gestirn abwechselnd direkt oder in einem Quecksilberhorizont wahrgenommen werden kann. Diese Anordnung bietet die Möglichkeit die Instrumentalfehler aus den gewonnenen Beobachtungsdaten selbst eliminieren zu können. Da auch die Fixsterne ihre Orte mit Bezug auf die gewählten Fundamentalebenen langsam ändern (Präzession, Nutation), so werden deren Wirkungen für den Zeitraum zwischen zwei beobachtenden Kulminationen berücksichtigt werden müssen, ebenso etwa merkbare Eigenbewegung. Das läßt sich aber mit einer auch den schärfsten Anforderungen genügenden Genauigkeit ausführen.

2b) Sonnenhöhen zur Zeit der Solstitien. Eine andere jedoch wesentlich geringere Genauigkeit verbürgende Methode zur Breitenbestimmung ohne Kenntnis von Zeit und Deklination des Gestirnes würde die Messung der Sonnenhöhen zur Zeit der Solstitien sein (1)[1]. Die Sonne wird zu diesen Zeiten genau die gleiche nördliche und süd-

[1]) Solche in Klammern dem Texte eingefügten Ziffern verweisen auf ein unter „Literatur" mit derselben Zahl versehenes Werk.

liche Deklination haben und somit würde das Mittel aus den beiden, allerdings ein halbes Jahr auseinander liegenden Höhenmessungen, die Meridianhöhe des Äquators ergeben, also das Komplement der Breite.

Diese Art der Bestimmung von φ ist allerdings von der Kenntnis der Sonnendeklination unabhängig, sie setzt nur deren Gleichheit in nördlichem und südlichem Sinne zur Zeit der Solstitien voraus. Diese Momente werden aber nur sehr unwahrscheinlicherweise gerade mit den Meridiandurchgängen der Sonne zusammenfallen, es würde dadurch eine kleine Korrektion notwendig werden, die allerdings aus der Theorie der Erdbewegung mit genügender Sicherheit abgeleitet werden kann, die aber immerhin auch eine Kenntnis der Zeit erforderlich macht, da man den Stundenwinkel der Sonne zur Zeit der genauen Solstitien würde kennen müssen. Die Methode ist im Altertum sehr häufig angewandt worden, heute aber für die Zwecke der Breitenbestimmung ohne Bedeutung. Die Aenderung der Sonnendeklination beträgt kurz vor und nach der Zeit der Soltitien in 24 Stunden allerdings nur wenige Bogensekunden.

2c) Meridianzenitdistanzen. Nur für den Fall der Beobachtung beider Kulminationen desselben Gestirnes kann die Kenntnis von dessen Deklination und in gewissem Maße auch die der Zeit entbehrt werden. Wird die Zenitdistanz eines oder mehrerer Sterne zur Zeit ihrer größten Höhe, also im Meridian gemessen, so gibt die Beziehung

$$\varphi = Z^0 + \delta \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1)$$

für jede Messung einen Wert der geographischen Breite für den Fall, das die Deklination (δ) des beobachteten Gestirns bekannt ist. Es ist also nur nötig im Moment des Meridiandurchganges eines Gestirnes dessen Zenitdistanz zu messen (2).

Die Messung erfolgt mittels eines im Meridian aufgestellten Vertikalkreises oder auch mit Benutzung eines Reflexionsinstrumentes über dem natürlichen (auf dem Meere) oder einem künstlichen Horizont. Da auf die genaue Bestimmung der Zenitdistanz nicht nur die Fehler des Instruments (Indexfehler, Zenitpunktfehler, Teilungsfehler, Biegung des Fernrohres usw.), sondern auch die der Pointierung selbst Einfluß haben und außerdem die Unrichtigkeit in der Kenntnis der Sterndeklination voll in das Resultat eingeht, so ist es für die Gewinnung scharfer Resultate nötig, die Beobachtung auf recht viele in geeigneter Weise ausgewählte Sterne zu erstrecken. Ist i der Index- oder der Zenitpunktfehler des Instruments, b die Konstante der Biegung des Fernrohres, so hat man für jeden beobachteten Stern die Gleichung

$$\varphi = z^0 + \delta \pm i \pm b \sin z^0 \quad \ldots\ldots \quad 2)$$

wo sich das doppelte Vorzeichen bei i auf die beiden Kreislagen des Instruments und das bei b auf die Beobachtung im Süden oder Norden des Zenits bezieht. Es läßt sich also durch die Beobachtung in beiden Lagen des Instruments das i eliminieren und bestmimen und durch die Beobachtung im Süden und Norden des Zenits der Wert von b finden und sein Einfluß zum verschwinden bringen, wenn man dafür sorgt, daß die Summe der gemessenen Zenitdistanzen in beiden Zweigen des Meridians sehr nahe einander gleich wird. Der Wert von b ist die Biegung des Fernrohres im Horizont. Je größer die Anzahl der Gestirne und je verschiedener die in Benutzung kommenden Stellen des Kreises gewählt werden, desto sicherer werden auch bei der nach der Methode der kleinsten Quadrate auszuführenden Gesamtauswertung die Fehler in der Deklination und in der Kreisteilung eliminiert, soweit diese wie man im allgemeinen anzunehmen berechtigt ist, zufälliger Natur sind.

2d) Horrebow-Talcott-Methode (Differenzen von Meridianzenitdistanzen). In neuerer Zeit ist eine schon von dem dänischen Astronomen Horrebow (3) angegebene und später von dem Engländer Talcott wieder aufgenommene Methode der Breitenbestimmung wieder in Verwendung genommen, die darin besteht, daß man im Meridian südlich und nördlich des Zenits, zwei die gleiche oder sehr nahe die gleiche Zenitdistanz erreichenden Sterne beobachtet und deren Meridianzenitdistanz mißt. Man hat nach der Grundformel für die beiden Sterne

$$\varphi = \delta_s + z_s \text{ und } \varphi = \delta_n - z_n \text{ ; ist } z_s = z_n,$$

$$\text{so wird } \varphi = \frac{1}{2}(\delta_s + \delta_n) \quad \ldots\ldots \quad 3)$$

Da zwei Sterne, die genau in gleichen Zenitdistanzen südlich und nördlich des Zenits kulminieren, kaum vorhanden sein werden, oder wenn dieses für einen bestimmten Tag der Fall sein sollte, doch der Einfluß von Präzession und Nutation diese Uebereinstimmung gleich wieder stören würde, so gelangt in der Praxis das Problem nicht rein zur Darstellung, sondern man wird zwei Sterne aussuchen, die nur innerhalb enger Grenzen (einiger Bogenminuten) gleiche Zenitdistanz erreichen. Stellt man dann die Absehenslinie des Fernrohres so ein, daß diese etwa auf das Mittel der Zenitdistanzen gerichtet ist, so kann man die Abweichungen der Zenitdistanzen der beiden Sterne von diesem Mittel mikrometrisch messen, und werden diese Beträge mit m_s und m_n bezeichnet, so hat man

$$\varphi = \frac{1}{2}(\delta_s + \delta_n) + \frac{1}{2}(m_s - m_n) \quad \ldots\ldots \quad 4)$$
$$+ \frac{1}{2}(r_s - r_n)$$

wo ($r_s - r_n$) die Wirkung einer etwa in Betracht zu ziehenden Refraktionsverschiedenheit berücksichtigen soll. Da derartige Beobachtungen aber nur in geringen Zenitdistanzen (nicht über 20 bis 25 Grad) ausgeführt zu werden pflegen, wenn sie den höchsten Anforderungen an Genauigkeit genügen sollen, so wird $r_s - r_n$ stets der Null gleichzusetzen sein. Die gleiche Neigung der Absehenslinie gegen die Normale am Beobachtungsort wird gesichert durch die Anwendung einer oder besser zweier sehr empfindlichen Libellen, die nach erfolgter Einstellung der mittleren Zenitdistanz mit der Achse des Fernrohres sehr sicher verbunden werden können. Da diese Libellen in beiden Lagen in praxi nicht genau

die gleichen Einstellungen der Blase zeigen werden, also bei der Umdrehung des Fernrohres um eine vertikale Achse, die Absehenslinie nicht immer genau den gleichen Winkel mit der Normalen einschließen wird, der event. Unterschied aber eben durch die verschiedenen Ausschläge der Libelle gemessen werden kann, so würde obigem Ausdruck noch das den Unterschied der Libellenangaben berücksichtigende Glied $^1/_2$ $(l_s—l_n)$ anzufügen sein, wenn ebenso wie $(m_s—m_n)$ und $(r_s—r_n)$ auch $(l_s—l_n)$ in Bogensekunden ausgedrückt wird. Abgesehen davon, daß man den Betrag der mikrometrisch zu messenden Bögen nicht zu groß wählt (ihre Summe soll etwa 10′ bis 12′ nicht überschreiten), wird man auch darauf zu sehen haben, daß zwischen den beiden Kulminationszeiten eines Sternpaares kein zu großes Zeitintervall liegt, da sonst die absolute Unveränderlichkeit des Winkels zwischen Libellenachse und Absehenslinie, die unbedingte Voraussetzung ist, nicht verbürgt werden kann. Außerdem soll bei der Auswahl der Sternpaare, deren man 20 bis 30 in einem Abend beobachten kann, darauf gesehen werden, daß die Gesamtsumme der $m_s—m_n$ möglichst nahe gleich Null wird, da dann ein Fehler in der Kenntnis des Winkelwertes einer Umdrehung der Mikrometerschraube ohne Einfluß bleibt. Das gleiche gilt auch bezüglich der Werte von $l_s—l_n$ und des Winkelwertes eines Niveauteiles. Durch die scharfe Durchführung der Polhöhenbestimmungen nach der Horrebow-Talcott-Methode ist es geglückt, die schon früher von Bessel vermutete

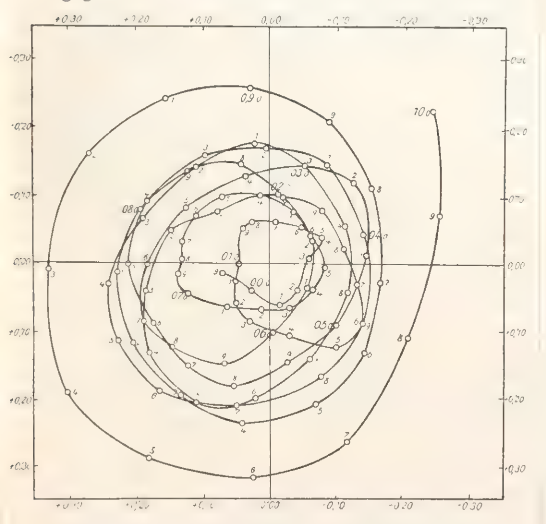


Fig. 3. Die Bewegung des Nordpols der Erde von 1899 bis 1910.

Veränderlichkeit der Polhöhe mit Sicherheit nachzuweisen und ihren Verlauf zu verfolgen (4). Diese Schwankungen der jeweiligen Lage der Erdachse sind von sehr geringem Betrag etwa 0.2 bis 0.3 Bogensekunden (das sind 6 bis 9 Meter linearen Maßes) gegenüber einer mittleren Lage. Sowohl Amplitude als die Periode der Schwankungen (diese beträgt etwa 420 Tage) sind selbst wieder starken, bis jetzt noch nicht übersehbaren Veränderungen unterworfen (vgl. dazu die Skizze).

2e) Zirkummeridianzenitdistanzen. Wird die Zeit der Beobachtung, d. h. also die an die benutzte Beobachtungsuhr anzubringende Korrektion auf richtige Zeitangabe als bekannt vorausgesetzt, so würde mit deren Hilfe der Moment des Meridiandurchganges für einen jeden Stern, dessen Rektascension bekannt ist, sich scharf angeben lassen. Die vorher erwähnten Methoden der Breitenbestimmung werden durch diese Kenntnis insofern eine Vereinfachung und Verschärfung erfahren, als der Moment für die auszuführende Zenitdistanzmessung mit größerer Schärfe angegeben werden kann, als durch die Einschaltung der irgendwie bestimmten Meridianrichtung. Außerdem werden sich auch für den Fall, daß die Zenitdistanz-

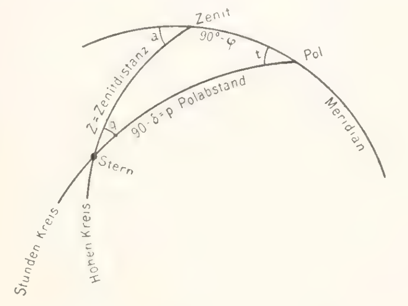


Fig. 4. Astronomisches Dreieck.

messung um ein kleines Zeitintervall vor oder nach dem Meridiandurchgang stattgefunden haben sollte, mit Hilfe eben dieser zeitlichen Abweichung (dem Stundenwinkel) Korrektionen auf die Meridianzenitdistanz angeben lassen.

Die Ableitung der geographischen Breite aus einer Höhen- oder Zenitdistanzmessung wird aber bei scharfer Kenntnis der Uhrkorrektion Δu auch gar nicht mehr an die Messung im Meridian oder in dessen allernächster Nähe gebunden sein, da die sphärische Trigonometrie auf Grund der Beziehungen in dem sphärischen Dreieck: Pol — Zenit — Stern (sogenanntes astronomisches Dreieck) aus gemessener Zenitdistanz (z) und Stundenwinkel (t) und den bekannten Koordinaten des Gestirns (α u. δ) die Breite (φ) zu bestimmen gestattet, es ist

$$\cos z = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t \quad \ldots 5)$$

Diese Formel ist aber für die Ableitung des Wertes von φ aus den übrigen Stücken nicht zweckmäßig, da sie quadratisch ist. Man gestaltet dieselbe deshalb in geeigneter Weise um, indem man entweder, wie vielfach gebräuchlich, Hilfswinkel einführt oder bezüglich des Stundenwinkels zum halben Winkel übergeht. Dann hat man:

$$\cos(\varphi - M) = \frac{\cos z \sin M}{\sin \delta} \quad \ldots\ldots 6)$$

und

$$\operatorname{tg} M = \operatorname{tg}\delta \sec t$$

oder man rechnet unter Anwendung eines genäherten Wertes von φ die Korrektion aus, die an die wirklich gemessene Zenitdistanz (z) anzubringen ist, um sie auf die Meridianzenitdistanz z^0 zu reduzieren. Das geschieht dann mit Hilfe der Beziehung:

$$\sin {}^1/_2 (z - z^0) = \frac{\cos\varphi \cos\delta}{\sin {}^1/_2 (z + z^0)} \cdot \sin^2 \frac{t}{2} \quad \ldots 7)$$

oder wenn man $z - z^0 = \varDelta z$ setzt:

$$\sin {}^1/_2 \varDelta z = \frac{\cos\varphi \cos\delta}{\sin {}^1/_2 (\delta - \varphi + z)} \cdot \sin^2 \frac{t}{2} \quad \ldots 8)$$

Differenziert liefert die Fundamentalformel die Abhängigkeit der resultierenden Breite vom Stundenwinkel in der Form

$$d\varphi = \frac{\sin t \, . \, dt}{tg\delta - tg\varphi \cos t} = - tg a \cos\varphi \, dt \quad \ldots 9)$$

Daraus geht hervor, daß ein Fehler im Stundenwinkel oder was dasselbe ist in der Uhrkorrektion um so geringeren Einfluß auf die Bestimmung von φ oder auf $\varDelta z$ hat, je mehr sich das Azimut 0° oder 180° nähert, also in der Nähe des Meridians. Macht man von diesem Umstand Gebrauch, so wird es erlaubt sein, bei der Kleinheit von $\varDelta z$ und t zu Reihenentwickelungen für $\varDelta z$ nach Potenzen des Stundenwinkels überzugehen.

Die gebräuchlichste Form einer solchen Reihe ist die folgende:

$$\left.\begin{aligned} \varDelta z &= \frac{\cos\varphi \cos\delta}{\sin(\varphi - \delta)} \cdot 2 \frac{\sin^2 \frac{t}{2}}{\sin 1''} \\ &- \left(\frac{\cos\varphi \cos\delta}{\sin(\varphi - \delta)}\right)^2 \cdot \cot g\,(\varphi - \delta) \cdot \frac{2 \sin^4 \frac{t}{2}}{\sin 1''} \\ &+ \frac{2}{3}\left(\frac{\cos\varphi \cos\delta}{\sin(\varphi - \delta)}\right)^3 (1 + 3 \cot g^2 (\varphi - \delta)) \cdot \frac{2 \sin^6 \frac{t}{2}}{\sin 1''} \end{aligned}\right\} \quad 10)$$

dann wird $\varphi = \delta + (z - \varDelta z)$

und obgleich diese Reihe recht gut konvergiert, ist sie doch nur zweckmäßig, wenn t so klein und z so gewählt wird, daß man das 3. Glied vernachlässigen kann. Das gilt im allgemeinen für t <30 Minuten und z> 25°, je größer z desto größer kann auch t als noch zulässig gelten, für z setzt die Unruhe der Bilder und die Unsicherheit der Refraktion die Grenze auf etwa 70 Grad.

Für die praktische Rechnung gibt man der Formel die Gestalt

$$\varphi = \delta + z - Am + A^2 \cot g\,(\varphi - \delta)\, n,$$

$$\left.\begin{aligned} &\text{wo } A = \frac{\cos\varphi \cos\delta}{\sin(\varphi - \delta)}; \; m = \frac{2 \sin^2 \frac{t}{2}}{\sin 1''} \\ &\text{und} \qquad n = \frac{2 \sin^4 \frac{t}{2}}{\sin 1''} \end{aligned}\right\} \quad \ldots 11)$$

bedeutet. Für alle drei Größen besonders aber in ausgedehnter Form für m und n hat man zweckmäßige Hilfstafeln, die die Rechnung außerordentlich erleichtern (5). Man mißt natürlich eine ganze Anzahl (8 bis 12) Zenitdistanzen in der Nähe des Meridians, möglichst symmetrisch zu diesem und auf die verschiedenen Lagen des Instrumentes verteilt. Es ist aber für die Diskussion des Resultates dringend zu raten, die Beobachtungen einzeln auszurechnen, da sonst Beobachtungsfehler leicht unentdeckt bleiben. Der Ausdruck von A bleibt für alle solche Messungen derselbe, solange sie sich auf denselben Stern und Erdort beziehen. Für die untere Kulmination kehrt sich das Vorzeichen von $\varDelta z$ um, und man hat statt $\varphi - \delta$ den Wert $\varphi + \delta$ zu setzen. Für Sterne zwischen Zenit und Pol ist nur $\varphi - \delta$ mit $\delta - \varphi$ zu vertauschen.

2f) Zenitdistanzen polnaher Sterne besonders des Polarsternes (α Ursae minoris). Mit besonderem Vorteil kann in ähnlicher Weise auf der nördlichen Halbkugel auch der Polarstern (α Ursae minoris) zur Bestimmung der Breite benutzt werden. Da seine Höhenänderung für alle Stundenwinkel auch im ungünstigen Fall nur gering ist (in der größten Digression, d. h. wenn der durch ihn gelegte Höhenkreis senkrecht auf seinem Stundenkreis steht), nur etwa 20″ in der Zeitminute, so braucht man die Beobachtungszeit auch dann nicht genauer als auf etwa 3^s zu kennen, um in z noch auf 1″ sicher zu sein. (Abgesehen von anderen Fehlereinflüssen auf die Messungen.) In der Nähe seiner Kulminationen liefert auch in diesem Falle der Polarstern noch viel günstigere Resultate.

Man kann zur Auswertung der Messungen entweder die oben angegebene strenge Rechnungsvorschrift anwenden oder bei kleinen Stundenwinkeln auch die bequemeren Reihenentwickelung benutzen.

Da α Ursae minoris jetzt aber nur etwa 70′ vom Pole absteht, wird mit Vorteil von diesem Umstand zum Zwecke der Reihenentwickelung Gebrauch gemacht, indem man die an die gemessene Zenitdistanz anzubringende Verbesserung zum Teil in eine Reihe entwickelt, die nach Potenzen des Polabstandes (p) fortschreitet. Man hat danach

$$\varphi = 90^0 - (z + p \cos t - \frac{1}{2} p^2 \sin 1'' \, tg\varphi \sin^2 t$$
$$- \frac{1}{6} p^3 \sin^2 1'' (1 + 3 \, tg^2\varphi) \sin^2 t \cos t \quad \ldots 12)$$

Für die praktische Rechnung pflegt man diese Reihe noch etwas umzugestalten, indem man setzt:

$$M = \frac{1}{2} p^2 \sin 1'' \, tg\,\varphi \quad \ldots\ldots 13)$$

$$\text{und } N = \frac{1}{6} p^3 \sin^2 1'' (1 + 3 \, tg\,\varphi) \sin^2 t \cos t$$

und diese Werte mit φ und t als Argumente tabuliert (5). Dabei ist man zunächst gezwungen, wenigstens in der zweiten Tafel für p einen konstanten Wert zu nehmen, was der Wirklichkeit nicht entspricht, da p wegen der Aenderung der Fundamentalebenen stark veränderlich ist (p nimmt jetzt im Jahr etwa 18½ Bogensekunden ab) und schwankt im Jahre um nahe 50″. Diesem Umstand wird Rechnung getragen durch die aus kleinen Täfelchen mit p zu entnehmenden Werte: $M = M_0 \frac{p^2}{p_0^2}$ und $N = N_0 \frac{p^3}{p_0^3}$ indem

man nicht M und N direkt, sondern M_0 und N_0 für den konstanten Betrag p_0 tabuliert (für welchen man einen für etwa 10 Jahre gültigen Mittelwert von p wählt).

Ist das zu beobachtende Gestirn die Sonne, so muß beachtet werden, daß diese nur zur Zeit der Solstitien ihre größte Höhe im Meridian erreicht, sonst aber wegen der Aenderung ihrer Deklination entweder vor (abnehmende Deklination) oder nach (zunehmende Deklination) dem Moment des Meridiandurchganges. Es ist dann zweckmäßig das Formelsystem (10) mit der Modifikation anzuwenden, daß man die t nicht vom Meridiandurchgang, sondern vom Moment der größten Höhe an zählt. Die an die Stundenwinkel anzubringende Korrektion σ ist nach der Gleichung $(9.40594-10)(\mathrm{tg}\varphi - \mathrm{tg}\delta)\,\Delta\delta$ zu berechnen, wo die Zahl in den Klammern den Logarithmus eines konstanten Faktors und $\Delta\delta$ die stündliche Aenderung der Deklination der Sonne bedeutet.

2g) Methode der „gleichen Höhen". An die Stelle der Bedingung, daß die Beobachtungen in nächster Nähe des Meridians ausgeführt werden, kann auch z. B. die treten, die Zeiten zu beobachten zu denen zwei oder mehr Gestirne die gleiche Höhe erreichen. Wählt man zu diesem Zwecke zwei Sterne aus, so ist deren Nähe am Meridian für die Momente der Beobachtung noch wünschenswert; werden aber drei oder mehr Sterne unter dieser Bedingung beobachtet, dann ist eine möglichst gleichmäßige Verteilung über den ganzen Horizont vorzuziehen. Bei drei oder mehr Sternen ist auch die Kenntnis der Höhe und der Zeit selbst nicht mehr nötig, da diese aus der Berechnung der Beobachtungen mit erhalten werden können. Die Auswertung der Beobachtungsdaten hat dann nach den einfachen Fundamentalformeln in der Weise zu geschehen, daß man unter Annahme von Näherungswerten die wahrscheinlichsten Korrektionen der in erster Näherung angenommenen Werte für φ, Δu und z resp. h ausrechnet (vgl. Zeitmessung).

Mit Ausnahme der Horrebow-Talcott-Methode und (in gewissen Grenzen) der letztangeführten Methode der Breitenbestimmung sind die bisher angegebenen Verfahren von der Güte der Kreisteilung des zur Zenitdistanzmessung benutzten Instrumentes abhängig, soweit nicht durch möglichste Variation der Ablesungsstellen der Kreise diese Fehler nahezu unschädlich gemacht werden können.

2h) Beobachtungen der Durchgänge von Gestirnen durch den „Ersten Vertikal" bei geringer Zenitdistanz. Die geographische Breite kann aber auch ganz ohne Benutzung einer Kreisteilung (abgesehen von der Aufsuchung der Gestirne) gefunden werden. Dahin gehört die Beobachtung der Zeiten, zu denen ein Gestirn genau den I. Vertikal, d. h. den zum Meridian senkrecht stehenden Höhenkreis passiert.

Diese zuerst wohl von Römer (6) angegebenen Methoden der Breitenbestimmung im ersten Vertikal beruht darauf, daß das Dreieck Pol—Zenit—Stern in diesem Fall

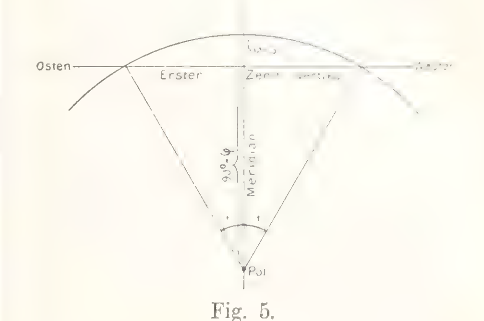


Fig. 5.

rechtwinklich am Zenit wird und die Beziehung zwischen Stundenwinkel (t) und der geographischen Breite (φ) die einfache Gestalt

$$\mathrm{tg}\varphi = \mathrm{tg}\delta \sec t \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 14)$$

annimmt, in welcher außer der Kenntnis von t zur Zeit des Durchgangs durch den I. Vertikal nur noch die der Deklination des Sternes notwendig ist. Wird die Durchgangszeit sowohl im Ost- als im Westzweig des I. Vertikals beobachtet, so erhält man als Differenz beider Uhrangaben 2t, nur abhängig vom Uhrgang (δu) während dieser Zeit, aber ohne, daß die Uhrkorrektion (Δu) selbst bekannt zu sein braucht.

Eine andere häufig verwendete Gleichung für die Berechnung der Beobachtungen im I. Vertikal ist die folgende:

$$\sin(\varphi - \delta) = \sin\varphi \cos\varphi \,.\, 2 \sin^2 \frac{t}{2} \quad . \; . \; 15)$$

In diesem Fall ist ein möglichst genäherter Wert von φ nötig, was bei der Anwendung dieser Methode stets der Fall sein wird; außerdem gestaltet sich die Rechnung einfach, da bequeme Tafeln für $2 \sin^2 \frac{t}{2}$ vorhanden sind.

In der Praxis pflegt man diese Methode gewöhnlich mit Hilfe eines Durchgangsinstrumentes (am besten eines solchen mit gebrochenem Fernrohr, da bei diesem die Bestimmung der Achsenneigung wesentlich bequemer wird) auszuführen, dessen Umdrehungsachse im Meridian liegt. Dann wird bei Bewegung um diese Achse die Absehenslinie den ersten Vertikal beschreiben. Mit Hilfe eines kleinen Vertikalkreises am Instrument kann die Zenitdistanz, in welcher der Stern den ersten Vertikal passiert, eingestellt werden. Die Methode ist unabhängig von jeder Kreisteilung, aber die Fehler des Instrumentes und seiner Aufstellung, der Kollimationsfehler (c), der Neigungs- (i) und der Azimutfehler (k) haben auf die Durchgangszeit und damit auf den resultierenden Wert von φ Einfluß. Er läßt sich für beide Formeln wie folgt darstellen:

Man setzt $\operatorname{tg} \varphi^1 = \operatorname{tg} \delta \sec t$

$$\text{wird } \varphi = \varphi^1 \pm c \sec z + i \pm k \operatorname{tg} z \quad . \quad . \quad 16)$$

$$\left.\begin{aligned} \text{oder } \sin(\varphi^1 - \delta) &= \sin(\varphi) \cos\delta \,.\, 2 \sin^2 \frac{t}{2} \\ \text{und } \varphi &= \varphi^1 \pm c + i \cos z \pm k \sin z \end{aligned}\right\} \quad . \quad 17)$$

wo (φ) ein Näherungswert und φ^1 den nicht für die Instrumentalfehler korrigierte Wert von φ bedeutet.

Die doppelten Vorzeichen gelten bei c für den Durchgang im Ost- oder Westzweig des I. Vertikals. Daraus ist zu sehen, daß sich diese beiden Fehler durch geeigneten Beobachtungsmodus — Umlegen des Instruments zwischen Ost- und Westdurchgang oder noch besser während des Ost- und Westdurchganges — eliminieren lassen (ihre Konstanz vorausgesetzt). Die Neigung der Umdrehungsachse gegen die Horizontalebene geht aber mit ihrem vollen oder nahezu vollen Betrage stets in das Resultat ein. Deshalb ist vor allem eine sehr genaue Bestimmung dieser Abweichung von der idealen Aufstellung des Instruments notwendig (7).

Für die zweckmäßige Berechnung der Beobachtungen gibt es sehr bequeme Hilfstafeln.

Diese Methode gewährt bei sicherer Aufstellung des Instruments eine sehr große Genauigkeit, die den Resultaten aus dem Horrebow-Talcott-Verfahren nahezu gleichkommt. Die Abhängigkeit des Resultates von t und δ stellen die Differentialausdrücke dar:

$$\left.\begin{aligned} d\varphi &= \sin\varphi \,.\, \operatorname{tg} z \,.\, dt = \sin\varphi \operatorname{tg}(\varphi - \delta)\, dt \\ \text{und} \quad d\varphi &= \frac{\sin 2\varphi}{\sin 2\delta}\, d\delta \end{aligned}\right\} \quad . \; . \; 18)$$

Daraus geht hervor, daß man δ so nahe als möglich gleich φ wählen muß, um sowohl den Einfluß eines Fehlers in t als auch in δ so klein als möglich zu machen. Es soll δ nicht mehr als 2 bis 3 Grad kleiner als φ sein.

Weiterhin zeigt sich, daß die Methode in niederen Breiten im allgemeinen günstiger, in höheren ungünstiger wird.

2i) Beobachtungen der größten Digressionen und sogenannte absolute Methoden. Zur Breitenbestimmung können noch eine Reihe anderer Methoden verwendet werden, die aber entweder wegen geringerer Sicherheit oder wegen großer Umständlichkeit der Rechnung wenig Eingang für geographische Ortsbestimmungen gefunden haben, sondern nur in Ausnahmefällen oder auch dann zur Anwendung empfohlen worden sind, wenn es darauf ankommt das Resultat unabhängig von den Orten der benutzten Gestirne zu erhalten (vgl. dazu die Beobachtungen von Zirkumpolarsternen S. 556).

Wird der azimutale Unterschied der beiden Punkte des Himmels beobachtet, in denen ein Stern im Osten und im Westen in seine größte Digression (s. oben) gelangt, so liefert das Dreieck Pol—Zenit—Stern, welches dann am Stern rechtwinkelig wird, die Beziehung

$$\cos\varphi = \cos\delta \operatorname{cosec} a \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 19)$$

Da der Wert von a dann als halber Betrag der fast unabhängig von allen Instrumentalfehlern — wenn nur die Stabilität während kurzer Zeit verbürgt werden kann — erhaltenen Azimutdifferenz gefunden wird, so sind die Resultate ziemlich sichere.

Die praktische Ausführung läuft darauf hinaus, mittels eines Universalinstrumentes das Gestirn zur Zeit seiner größten Digression zu verfolgen und dann, wenn keine Azimutänderung mehr erfolgt, den Horizontalkreis abzulesen. Wird diese Ablesung mit einer solchen für die Visur auf ein möglichst entferntes aber deutlich einstellbares irdisches Objekt verbunden und dasselbe Verfahren in der anderen Digression wiederholt, so wird die Azimutdifferenz ganz unabhängig von der Einstellung auf das irdische Objekt. Und da die Einstellungen auf das Gestirn und die auf die Marke beidemale in gleicher Zenitdistanz erfolgen, kommt auch die Wirkung etwaiger Instrumentalfehler nicht in Betracht. Auch die Teilungsfehler des Kreises können durch Wiederholung der Messung an verschiedenen Sternen oder an verschiedenen Abenden bei Drehung des Kreises unschädlich gemacht werden.

Auch die Digressionen verschiedener Sterne können auf diese Weise miteinander verbunden werden. Das hat den Vorteil, daß man nicht auf die beiden Digressionen desselben Sternes zu warten braucht. Es bedarf dann aber einer zweckmäßigen Auswertung der Beobachtungsdaten nach der Methode der kleinsten Quadrate.

Das noch erwähnte absolute Verfahren der Bestimmung der geographischen Breite erfordert umständliche Beobachtungen verschiedener Kombinationen von Sternen entweder im gleichen Vertikal (Vorschlag von W. Förster) (8) oder in gleicher Höhe im Meridian und im Osten und Westen (Vorschlag von Kapteyn) (9). Es kann hier auf näheres Eingehen verzichtet werden und muß auf die betreffenden Originalabhandlungen verwiesen werden.

2k) Beobachtungen von Gestirnen im Norden und Süden und im Osten und Westen in paarweise gleichen Höhen. In neuerer Zeit sind zur Breitenbestimmung mehrfach Methoden, die an sich nicht neu sind, in Vorschlag gebracht worden (und die z. T. den eben erwähnten ähnlich sind), wegen der Umständlichkeit der Vorbereitungsrechnungen und der endgültigen Auswertung aber wenig zur Anwendung gelangten. Durch die zweckmäßige Gestaltung von Tafeln und besonders zu diesen Zwecken angelegter Verzeichnisse geeigneter Sterngruppen, ist ihre Anwendung allgemeiner geworden. Es gehören dorthin die Beobachtung zweier Gestirne in der Nähe des südlichen und nördlichen Teiles des Meridians in genau gleichen Zenitdistanzen, oder wenn auch die Uhrkorrektion mit bestimmt werden muß, die Beobachtung weiterer Paare in der Nähe des I. Vertikals ebenfalls in gleicher eventuell in derselben Zenitdistanz wie die des Süd- und Nordsternes.

Die Anwendung dieser Methode beruht auf der Gleichung

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{\cos\delta_s \cos t_s - \cos\delta_n \cos t_n}{\sin\delta_s - \sin\delta_n}$$

wo $t_s = U_s + \Delta u - \alpha_s$ und $t_n = U_n + \Delta u - a_n$ bedeutet.

Diese Formel läßt sich bequemer gestalten, wenn man setzt

$$\delta = \frac{\delta_n + \delta_s}{2};\ \varepsilon = \frac{\delta_n - \delta_s}{2};\ \sigma = \frac{t_n + t_s}{2}$$

$$\text{und}\ \ \tau = \frac{t_n - t_s}{2}$$

dann hat man:

$$\operatorname{tg} \varphi = \operatorname{cotg} \varepsilon \sin \sigma \sin \tau + \operatorname{tg} \delta \cos \sigma \cos \tau$$

Die Differenzierung liefert

$$d\varphi = \frac{\cos \varphi}{\operatorname{tg} \frac{1}{2}(a_s + a_n)}\, dt$$

$$\text{und}\ d\varphi = \frac{1}{\cos a_s + \cos a_n}\, dz$$

woraus hervorgeht, daß die Sterne so ausgewählt werden müssen, daß $a_s + a_n$ nahezu 180^0 ergeben, d. h. wenn die Sterne symmetrisch zum I. Vertikal, aber auf derselben Seite des Meridians stehen, während sie andererseits in mittleren Azimuten stehen müssen, damit die Beobachtungsfehler, welche ja durch die Zeitangabe für den Durchgang durch die Horizontalfäden die Zenitdistanz bestimmen, keinen zu großen Einfluß auf die Breitenbestimmung gewinnen.

3. Methoden zur Zeit- und geographischen Längenbestimmung. 3a) Zeitrechnung. Uhrstand und Uhrgang. Allgemeine Erläuterungen. Nullmeridian. Zeitbestimmung. Die Längendifferenz zweier Orte ist, wie eingangs bemerkt, direkt der Unterschied der an diesen beiden Orten im gleichen Moment gültigen Ortszeit. Es ist daher eine geographische Längenbestimmung ohne Kenntnis der Ortszeiten nicht möglich. Es muß also die Bestimmung der Ortszeit oder der jeweilig gültigen Uhrkorrektion (Δu) als bekannt vorausgesetzt werden, so daß die geographische Längenbestimmung selbst sich schließlich nur auf die Angabe oder Ausführung zweckmäßiger Methoden zur Vergleichung der Ortszeiten beziehen wird.

Obgleich die Bestimmung der Ortszeit aus astronomischen Beobachtungen und die Messung bestimmter Zeitabschnitte einem besonderen Aufsatz (vgl. den Artikel „Zeitmessung) vorbehalten bleibt, so muß zum Verständnis des Folgenden doch auf das Fundamentale der astronomischen Zeitbestimmung auch hier kurz eingegangen werden.

Die Bestimmung der Ortszeit für einen gegebenen Moment besteht darin, daß man mit Hilfe von Gestirnen, die geeignet auszuwählen und an zweckmäßigen Stellen des Himmels zu beobachten sind, den Fehler einer Beobachtungsuhr bestimmt. Die Hinzufügung der so gewonnenen Korrektion zu der Uhrangabe (U) liefert die Ortszeit.

Die Einheit für unsere Zeitmessung ist die Dauer einer Umdrehung der Erde um ihre Achse, die, soweit wir sie heute messen können, völlig gleichmäßig und in gleichen Intervallen vor sich geht. Eine solche Umdrehung wird vollendet sein, wenn ein Punkt des Himmels zweimal hintereinander durch den Meridian ein und desselben Ortes hindurch gegangen ist. Ein solcher Punkt am Himmel wird durch einen jeden Fixstern gegeben sein (abgesehen von dessen Eigenbewegung und von der Wirkung der Präzession und Nutation). Beobachtet man also zwei seiner Durchgänge durch den Meridian, so soll eine Uhr in dem dazwischen liegenden Zeitraum genau 24 Stunden zurückgelegt haben. Es ist das dann ein sogenannter Sterntag.

Wird die Sonne als Beobachtungsobjekt benutzt, wie es das bürgerliche Leben erfordert, so wird das Zeitintervall zwischen zwei Meridiandurchgängen derselben ein wahrer Sonnentag genannt. Da die Sonne unter den Sternen scheinbar zurückweicht — wegen des Umlaufs der Erde um die Sonne — so ist ein Sonnentag länger als ein Sterntag und zwar um etwa 3 Minuten 56 Sekunden. Die Erde bewegt sich ungleichmäßig (in einer Ellipse) um die Sonne, daher sind die Sonnentage nicht gleich lang im Verlaufe eines Jahres (vgl. den Artikel „Zeitmessung“). Man muß daher, um gleichmäßig gehende Uhren, die zur Gewinnung der gleichmäßigen Einteilung des Tages in Stunden, Minuten und Sekunden nötig sind, gebrauchen zu können, an die Stelle des wahren Sonnentages einen mittleren Sonnentag setzen, der der Bedingung genügt, daß im Laufe eines Jahres ebenso viele wahre als mittlere Tage verstreichen, nur daß die mittleren Tage alle genau gleich lang angenommen werden, wodurch sie dem Fortschreiten einer Sonne (der sogenannten mittleren Sonne) entsprechen, die sich scheinbar mit gleicher Geschwindigkeit um die Erde drehen würde.

Uhren, die nach Sternzeit reguliert sind, nennt man „Sternzeituhren“ und solche nach mittleren Tagen regulierte „Mittlere Zeit-Uhren“; diese sind die überall im gewöhnlichen Leben gebräuchlichen. Wahre Sonnenzeit zeigen alle Sonnenuhren. Der im Laufe des Jahres veränderliche Unterschied zwischen wahrer und mittlerer Zeit im gleichen Moment heißt die für diesen gültige Zeitgleichung (vgl. den Artikel „Zeitmessung“).

Null Uhr mittlere Zeit für einen Ort setzt man auf den Moment, in dem das Zentrum der mittleren Sonne durch den Meridian dieses Ortes geht. Null Uhr Sternzeit ist es in dem Moment, in dem der Frühlingsanfangspunkt durch den Meridian des betreffenden Ortes geht. Astronomisch zählt man die Stunden von 0^h bis 24^h während des ganzen Tages durch und man beginnt diese Zählung im Gegensatz zum bürgerlichen Leben für die mittlere Zeit bei der oberen Kulmination der Sonne, also um Mittag und nicht um

Mitternacht, einmal damit in der Nacht, während der Hauptbeobachtungszeit ein Wechsel des Datums vermieden wird und dann, weil man bei der Zählung der Sternzeit auch so verfährt.

Da die Umdrehung der Erde gleichmäßig vor sich geht und direkt als zeitmessend verwendet werden kann, so wird die Zeit, welche verstreicht, von dem Durchgang des Meridians eines Ortes durch einen bestimmten Punkt des Himmels bis zum Durchgang des Meridians eines anderen Ortes durch denselben Punkt des Himmels direkt den Winkel messen, den eben diese beiden Meridiane auf der Erde miteinander einschließen, und das ist die Längendifferenz dieser beiden Orte. Wenn im Orte A ein bestimmter Punkt des Himmels (ein Fixstern) zur Zeit T_a durch den Meridian geht — es ist hier nur an die Stelle der wirklichen Umdrehung der Erde, die scheinbare des Himmelsgewölbes gesetzt, was natürlich an der Zeitangabe nichts ändert — so wird er durch den Meridian des Ortes B gehen, wenn die Uhr in A die Zeit T_b angibt, während in B selbst eine richtig gehende Uhr T_a zeigen muß. Ist man also auf irgendeine Weise imstande, auf der Uhr A die Kulmination desselben Sternes in A und in B zu bemerken, so wird $T_b - T_a$ sofort die Längendifferenz beider Orte angeben.

Jede geographische Längenbestimmung läuft also darauf hinaus, an dem Ort, dessen geographische Länge aufgesucht werden soll, für einen gegebenen Moment eine Zeitbestimmung zu machen und die im gleichen Moment gültige Zeit des Nullmeridians (oder eines Meridians, der durch einen Anschlußort geht) zu ermitteln. Die erforderlichen Zeitbestimmungen müssen für die Zwecke von Längenbestimmungen mit größerer Schärfe ausgeführt werden, als es z. B. für Breitenbestimmungen nach der Methode der Zirkummeridianzenitdistanzen oder anderer Beobachtungen im oder nahe dem Meridian nötig ist, da ein Fehler in der Uhrkorrektion mindestens mit dem vollen Betrage die Längendifferenz beeinflußt.

Man wählt deshalb auch nur die Beobachtung von Sterndurchgängen durch den Meridian oder durch den Vertikal des Polarsternes (mittels Durchgangsinstruments) oder die der korrespondierenden Höhen (mittels Reflexions- oder Universalinstruments). Andere Methoden werden nur in bestimmten Fällen angewandt, wie z. B. bei den Längenbestimmungen aus Mondhöhen.

Die Zeitbestimmung im Meridian beruht darauf, daß man beobachtet, welche Zeit die Beobachtungsuhr angibt im Moment der Kulmination eines Gestirnes, dessen Rektaszension genau bekannt ist. Da eine nach Sternzeit gehende Uhr immer genau so viel Zeit anzeigen muß, als ein Stern, der eben durch den Meridian geht, Rektaszension besitzt, so wird die Abweichung der Uhrangabe von der Rektaszension des Sternes in diesem Moment direkt ihre Korrektion (der Uhrstand) sein.

Solcher Beobachtungen macht man eine Anzahl kurz hintereinander und wählt dazu die Sterne so aus, daß man durch die Beobachtung ihrer Durchgangszeiten auch die Instrumentalfehler eliminieren kann (vgl. den Artikel „Zeitmessung“). Ganz ähnlich erfolgt die Beobachtung im Vertikal des Polarsternes, nur ist in diesem Fall noch der Stundenwinkel für die einzelnen Sterne aus der jeweiligen Lage des Beobachtungsvertikals zu berechnen. Die erlangte Genauigkeit ist fast dieselbe wie im Meridian, aber die Rechenarbeit ist erheblich größer. Man erhält den Fehler der Uhr durch solche Beobachtungen bis auf etwa $\pm 0{,}02$ Zeitsekunden sicher bei guter Anordnung der Beobachtungen und genügender Geschicklichkeit des Beobachters. Die Bestimmung des Uhrstandes aus korrespondierenden Höhen beruht auf der Ueberlegung, daß ein Fixstern in gleichen Abständen vom Meridian, also im gleichen Stundenwinkel genau die gleiche Höhe erreicht.

Beobachtet man also die beiden Zeiten, in denen diese gleichen Höhen erlangt werden, so wird das Mittel aus den beiden Uhrangaben diejenige ergeben, die man beobachtet haben würde im Moment des Meridiandurchganges und da diese wieder gleich der Rektaszension des beobachteten Gestirnes sein soll, so wird der Unterschied zwischen $\frac{1}{2}(U_o + U_w) - \alpha$ sofort gleich der Uhrkorrektion sein. Es ist dazu nur erforderlich, daß die benutzte Uhr in der Zwischenzeit U_o bis U_w gleichmäßig geht. Man soll deshalb diese Zwischenzeit nicht zu lang wählen; bei zu großer Nähe am Meridian werden aber die Momente für die gleichen Höhen unsicher, da dann die Höhenänderung nur langsam erfolgt. $U_w - U_o$ soll etwa zwischen 3 bis 5 Stunden liegen (verschieden nach der geographischen Breite). Bei beiden hier angeführten Methoden der Zeitbestimmung ist die Kenntnis der Breite entweder gar nicht oder nur genähert erforderlich.

Das Vorhandensein guter Zeitbestimmungen vorausgesetzt, wird also die Längenbestimmung nur darauf auszugehen haben, die Ortszeit zweier Orte miteinander zu vergleichen. Das kann auf verschiedene Weise geschehen.

3b) Gleichzeitige Beobachtung cölestischer Phänomene. Meteore. Mondfinsternis. Am einfachsten gelangt man dazu, wenn von beiden Orten aus irgendein scharf beobachtbares Phänomen gleichzeitig gesehen werden kann. Solche Ereignisse können cölestischen oder auch irdischen Ursprungs sein. Das Auftauchen und Verschwinden einer Sternschnuppe läßt sich benutzen; werden an beiden Orten A und B die betreffenden Zeiten (T_a und T_b) notiert, so wird die Längendifferenz ($\Delta\lambda$) sofort $T_b - T_a$ sein. Es ist dabei gleichgültig, ob für die Zeitangaben Sternzeit oder mittlere Zeit-Uhren verwendet werden.

In früherer Zeit sind solche Beobachtungen nicht selten wirklich verwendet worden, nur macht es häufig Schwierigkeiten, die Identität der Meteoriten festzustellen. Es ist dazu schon eine ziemlich genaue Kenntnis von $\Delta\lambda$ notwendig und außerdem ist die persönliche Auffassung des Aufleuchtens und Verschwindens von erheblichem Einfluß. Die Beobachtungen des Verschwindens liefern die genaueren Resultate.

Andere Ereignisse sind die Verfinsterung des Erdmondes oder die Eintritte der Monde des Jupiters in den Schatten des Planeten. Beide Phänomene sind objektiver Art, sie werden also an allen Punkten der Erde, an denen sie überhaupt sichtbar sind, auch in absolut gleichem Moment wahrgenommen werden. Der Unterschied der beobachteten Ortszeiten an verschiedenen Orten wird also ohne weiteres wieder deren Längendifferenz ergeben.

Anfang und Ende einer Mondfinsternis sind tatsächlich nicht ganz frei von parallaktischer Verschiebung, diese ist aber so gering, daß sie gegenüber der großen Unsicherheit mit der die Beobachtung des Ein- und Austrittes des Mondes in und aus den Erdschatten angegeben werden kann, ganz zurücksteht. Die Grenze des Schattenkegels der Erde ist sehr unscharf, einmal des ihn umgebenden Halbschattens wegen und zum anderen deshalb, weil auch der Kernschatten durch Refraktionswirkungen in der Erdatmosphäre keineswegs scharf ersichtlich wird. Genauere Resultate geben die Beschattungen der ausgeprägten Gebirgsformationen, da die Beobachtung der Momente ihres Ein- und Austrittes in und aus den Kernschatten mit ziemlicher Sicherheit auf die Zeit ihres Durchganges durch die Mittelebene schließen läßt. Eine eigentümliche Erscheinung bei solchen Finsternissen ist die, daß der Schattendurchmesser am Mond um etwa $^1/_{50}$ bis $^1/_{60}$ größer erscheint als die Theorie ihn angibt (10). Es scheint das im wesentlichen auf physiologischen Gründen zu beruhen, wie Seeliger in München (11) durch zahlreiche entsprechende Versuche gezeigt zu haben scheint.

Die Verfinsterung der vier hellen Jupitermonde lassen sich schon mit geringen optischen Hilfsmitteln wahrnehmen. Ihre Beobachtung würde eine recht zuverlässige Zeitvergleichung gestatten, wenn nicht auch diese Körper noch zu groß wären, als daß plötzliches Verschwinden des von ihnen reflektierten Lichtes erfolgte. Sowohl der Eintritt in den Schatten des Jupiters, als auch das Wiederhervortreten aus dem Schatten erfolgt allmählich und zwar um so schneller, je schneller sich der betreffende Mond in seiner Bahn um den Planeten bewegt. Diese Bewegung hängt von der Entfernung des Mondes vom Hauptkörper ab, ist also bei dem, dem Jupiter nächsten Mond am größten. Deshalb würden die beiden inneren Monde auch die besten Resultate liefern. Die wie kleine Sternchen erscheinenden Monde werden deshalb in einem kleinen Fernrohr früher verschwinden und später wieder sichtbar werden als in einem Fernrohr mit großer Oeffnung. Daher können auch hier nur die Beobachtungen der Ein- und Austritte in ihrem Mittelwert Resultate geben, die von der optischen Stärke der Fernrohre unabhängig sind. Die Ein- und Austritte können bei den beiden inneren Monden nicht am gleichen Abend beobachtet werden, da entweder der Eintritt oder der Austritt hinter der Planetenscheibe erfolgt. Wohl aber ist diese Beobachtung an den beiden entfernteren Monden möglich; dadurch gewinnen die Verfinsterungen dieser beiden wieder an Bedeutung. Bleibt man lange Zeit am selben Orte, so können allerdings die Eintritts-Beobachtungen der inneren Monde vor der Opposition des Jupiters mit denen des Austritts nach der Opposition zu guten Resultaten kombiniert werden. Gegenwärtig wird von Beobachtungen der Mondfinsternisse im wesentlichen nur noch zu astrophysikalischen Zwecken und von denen der Jupitermonde zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit usw. Gebrauch gemacht. Man hat auch früher einmal vorgeschlagen, das Wiederaufleuchten geeigneter Mondberge im aufgehenden Sonnenlicht als Signale im hier verwendeten Sinne zu beobachten. Die an sich gar nicht üble Idee hat aber ähnliche Nachteile, wie sie die Beobachtung der Jupitermonde bietet und sie ist wohl nur sehr selten zur Verwendung gelangt.

3c) **Beobachtung irdischer Erscheinungen. Lichtsignale.** An die Stelle der erwähnten cölestischen Signale können auch auf der Erde gegebene treten, wenn diese nur von den beiden zu verbindenden Orten aus direkt sichtbar sind oder wenn durch Zwischenschaltung anderer Beobachtungsstationen eine Verbindung hergestellt werden kann. Solche Signale pflegt man entweder des Nachts durch Pulverblitze, Leuchtkugeln u. dgl. oder bei Tage durch Heliotrope zu geben (12). Je nach der Schärfe, mit der solche Signale gegeben und aufgenommen werden können, wird die aus ihnen gefundene Längendifferenz größere oder geringere Genauigkeit besitzen.

Solche Beobachtungen sind bis zur Einführung des elektromagnetischen Telegraphen vielfach benutzt worden, besonders bei geodätischen Vermessungen, um die Entfernung der Endpunkte größerer Triangulationen außer auf linearem Wege auch durch den Winkel zwischen ihren Meridianen kennen zu lernen und dadurch Material für die Kenntnis der Gestalt unserer Erde beizubringen. Sind A und E die Orte deren Längendifferenz bestimmt werden soll, und $S_1 S_2 \ldots$ Punkte, an denen Signale gegeben werden, während $O_1 O_2 \ldots$ zwischengeschaltete Beobachtungsplätze sind, so wird man ein in S_1 gegebenes Signal in A zur Zeit T_a und in O_1 zur Zeit t'_1 wahrnehmen, weiterhin ein in S_2 gegebenes Signal in O_1 zur Zeit t'_2 und in O_2 zur Zeit t_1^2 und so fort bis in E das Signal vom letzten Zwischenpunkt zur Zeit T_e wahrgenommen wird. Aus einer genauen Verfolgung des Vorganges ersieht man dann, daß genaue Zeitbestimmungen nur in A und E notwendig sind, während in den Zwischenpunkten nur der Gang der Beobachtungsuhren für die kurz zu wählenden Zwischen-

zeiten $t_2 - t_1$ usw. bekannt zu sein braucht. Man kann als Schlußwert sofort angeben,

$$\varDelta\lambda = T_a^x - (t^1_2 - t^1_1) - (t^2_2 - t^2_1 - \ldots - T_e$$

wenn E der westlich gelegene von beiden Orten ist.

3 d) **Bestimmung der Längendifferenz mit Hilfe des elektrischen Telegraphen. „Persönliche Gleichung“.** Mit Einführung des elektrischen Telegraphen sind für die Gegenden, in denen solche Verbindungen bestehen, alle anderen Methoden der Längenbestimmungen stark in den Hintergrund getreten, da die elektrische Signalübertragung wesentlich genauer als jene gestaltet und zu jeder Zeit ausgeführt werden kann. Auch sind außer den zu den Zeitbestimmungen nötigen Instrumenten nur noch wenig andere Apparate erforderlich. Diese dienen einmal zur Abgabe und zum Empfang der Signale und weiterhin zur Ausgleichung der benutzten Stromstärken, sowie zur gegenseitigen Verständigung während der Beobachtungen.

Es ist leicht einzusehen, daß der Zweck der Zeitvergleichung schon erreicht wird, wenn ein Beobachter in A in einem bestimmten Moment seiner Ortszeit ein Signal nach B gibt durch Schließen oder Oeffnen eines elektrischen Stromkreislaufes, der beide Orte verbindet. Der Beobachter in B nimmt die Ankuft dieses Signals nach der dort herrschenden Ortszeit auf und unter der Voraussetzung, daß beide Uhren richtig gehen resp. ihre Korrektionen gegen richtige Zeit bekannt sind, liefert die Differenz beider Zeitangaben sofort die Längendifferenz. Da die Uebermittelung des Signals oder seiner Abgabe und Aufnahme nicht als momentan erfolgend anzusehen ist, so wird es tatsächlich nötig sein, einmal ein Signal von A nach B und das andere Mal ein solches von B nach A zu geben, um im wesentlichen die entstehenden Verzögerungen durch Bildung des Mittelwertes aus dem Resultat zu eliminieren.

Neuerdings sind auch schon Versuche gemacht worden drahtlose Telegraphie zur Uebertragung der Signale zu benutzen. Es war zu ermitteln, ob die gebräuchlichen Empfangsapparate die nötige Konstanz in ihrer Wirkungsweise besitzen. Die zwischen Potsdam und dem Brocken vor einigen Jahren angestellten Bestimmungen haben die Brauchbarkeit der Methode bewiesen und es wird wohl in Zukunft häufig von dieser Art der Signalgebung Gebrauch gemacht werden (13).

In der praktischen Ausführung wird die Erlangung der schärfsten Resultate nicht ganz so einfach sein als das Prinzip vermuten läßt. Wie schon angedeutet, müssen die benutzten elektrischen Ströme sowohl der Linien- als auch der Lokalbatterien, die zur Aufzeichnung der Signale dienen, sehr genau gegeneinander abgeglichen werden, um die sogenannten „Stromzeiten“ in beiden Richtungen einander gleich zu machen; denn sonst würde die Mittelbildung nicht zuverlässig sein.

Außerdem treten aber bei der Ausführung der Zeitbestimmungen und der Signalabgabe Unterschiede zwischen den verschiedenen Beobachtern auf, die man in der Astronomie als „persönliche Gleichung“ bezeichnet. Die beobachteten Uhrkorrektionen sind von diesen Verschiedenheiten abhängig (vgl. den Artikel „Zeitmessung“), deshalb ist es für die Erlangung der zuverlässigsten Resultate notwendig, daß nicht nur Signale in beiden Richtungen gewechselt werden, sondern daß auch ein Austausch der Beobachter und wenn möglich auch der Instrumente zwischen den beiden Stationen vorgenommen wird. Neuerdings hat man diese persönlichen Einflüsse, da sie selbst für den selben Beobachter nicht konstant sind, durch instrumentelle, gewissermaßen automatische Einrichtungen (unpersönliche Mikrometer) auszuschalten versucht, was auch zum großen Teil gelungen ist. Vielleicht gelingt es durch photographische Einrichtungen für die Bestimmung der Uhrkorrektion die beobachtende Persönlichkeit ganz auszuschalten. Solcher Längenbestimmungen, die gegenwärtig als die genauesten anzusehen sind, hat man im Laufe der letzten 4 bis 5 Dezennien eine große Anzahl ausgeführt (14). Da auf diese Weise viele Orte mehrfach und in verschiedenen Kombinationen miteinander in Beziehung gesetzt worden sind, war es von Wichtigkeit aus allen Bestimmungen, die am besten zueinander passenden zu ermitteln. Es sind deshalb von mehreren Seiten entsprechende Ausgleichungen vorgenommen worden, die als Resultate ein großes einheitliches System von Längendifferenzen ergeben haben (15). Ebenso wie man aus der Verbindung genauerer Breitenbestimmungen mit den trigonometrischen Messungen der wirklichen Bögen auf der Erdoberfläche Auskunft über die Gestalt und Größe der Erde erhalten kann, so ist es bei der zurzeit zu erlangenden Genauigkeit in der Ermittelung der Längendifferenzen möglich, die lineare Länge von Parallelkreisbögen mit jenem zu dem Zwecke der Bestimmung der Gestalt der Erde mit Erfolg in Beziehung zu setzen (16).

3 e). **Zeitübertragung.** Außer durch Abgabe von Signalen läßt sich die Zeit eines Ortes auch noch dadurch nach einem anderen übertragen, daß man direkt Uhren, die die Ortszeit des Ortes A anzeigen nach B bringt und sie dort mit einer Uhr vergleicht, die die Ortszeit von B angibt. Der Unterschied der Uhren im gleichen Moment ist selbstverständlich wieder die Längendifferenz. Dieses Verfahren wird heute noch sehr viel angewandt, wo mittelst Telegraphen oder anderer Signaleinrichtungen keine Verbindung zu erzielen ist oder wo von vornherein gar nicht angegeben werden kann, welche Orte in Betracht kommen, also auf Forschungsreisen.

Das Verfahren der Zeitübertragung durch Uhren oder Chronometer beruht darauf, daß man durch längere Beobachtungsreihen imstande ist, das Verhalten guter Uhren für einige Zeit

im voraus anzugeben. Die Aenderung der Korrektion wird bestimmt in besonders dazu eingerichteten Instituten (z. B. in der Deutschen Seewarte in Hamburg) oder auf Sternwarten. Kennt man diese Aenderungen, die im allgemeinen von der Temperatur und der Zeit selbst, im geringen Maße auch von der Feuchtigkeit der Luft und vom Luftdruck, abhängig sind, so läßt sich je nach der Güte der Uhren während einiger Wochen die Zeit eines Ausgangsmeridians mit ihrer Hilfe angeben. Die Schiffahrt macht in weitestem Maße von dieser Methode Gebrauch. Jedes Schiff auf größerer Fahrt führt 2 bis 3 Chronometer an Bord, deren Stand gegen Greenwich-Zeit täglich berechnet wird.

Ist g_0 der tägliche Gang der Uhr für 15° C, t die mittlere Temperatur der letzten 24 Stunden und T_0 eine bestimmte Epoche für die das g_0 gilt, so kann man setzen, wenn der tägliche Gang der Uhr bei t° C zur Zeit T gleich g sein soll

$$g = g_0 + \alpha\,(t^0-15^0) + \beta\,(t^0-15^0)^2 + \gamma\,(T-T_0).$$

Dabei ist auf den Einfluß des Luftdrucks und der Feuchtigkeit keine Rücksicht genommen. Die Größen α, β, γ sind Koeffizienten, die eben aus längeren Beobachtungsreihen in den betreffenden Instituten ermittelt werden und auf längere Zeit unter sonst gleichen Umständen konstant zu bleiben pflegen.

Es ist klar, daß man durch Summation der einzelnen Werte von g über die seit der letzten Bestimmung der Uhrkorrektion (Δ u) verflossene Anzahl der Tage, das Δ u für die Zeit T erhalten kann. Man würde dann haben

$$\Delta u_T = \Delta u_{T_0} + \Sigma\,(g)_{T_0}^{T}.$$

Diese Uhrkorrektion verglichen mit einer am Beobachtungsort gemachten Zeitbestimmung liefert dann sofort die Längendifferenz.

Es ist der Sicherheit des Resultates wegen nötig, daß solche Vergleichungen für mehrere Uhren ausgeführt werden können. Daher sollen die Schiffe mehrere Chronometer mit sich führen und die Reisenden zu Land so viel wie möglich gute Taschenuhren (Ankeruhren), da diese den Landtransport viel besser aushalten, als die mit sehr schweren Unruhen versehenen Schiffschronometer, welche mit sogenannten Chronometerhemmungen versehen sind, die ebenfalls gegen Erschütterungen sehr empfindlich sein können.

Am besten ist es, wenn bei solchen Zeitübertragungen der Reisende wieder zum Ausgangspunkt der Reise zurückkehren kann, um dort den Stand seiner Uhr von neuem zu bestimmen. Durch solche Schleifenbildung werden die Resultate erheblich verschärft, weil man dann eine Kontrolle für das Verhalten der Uhren während der ganzen Reise erhält.

3f) Beobachtungen des Mondes. Außer den bisher erwähnten Methoden der Längenbestimmungen, die gewissermaßen alle auf der Beobachtung irgendwelcher direkter Signale oder auf der wirklichen Zeitübertragung beruhen, gibt es noch eine Reihe cölestischer Erscheinungen, die ebenfalls geeignet sind, für einen gegebenen Moment die Zeit eines Ausgangsmeridians zu bestimmen. Diese gründen sich alle auf die Bewegung unseres Erdmondes. Da dieser in etwa 27 Tagen einmal um die Erde herumläuft, in dieser Zeit also scheinbar einen Umlauf zwischen den Sternen am Himmel vollendet, so wird seine jeweilige Stellung, d. h. seine Rektaszension, wenn dieselbe — gesehen vom Mittelpunkt der Erde aus — für die einzelnen Stunden der Ortszeit eines Nullmeridians (z. B. Greenwich oder Paris) tabuliert wird, erkennen lassen, wieviel es auf diesem Ausgangsmeridian Zeit sein muß, wenn der Mond eine bestimmte Rektaszension besitzt. Der Mond legt also in 24 Stunden im Mittel einen Bogen von 13° zurück, so daß für eine Zeitminute sich etwa 30 Bogensekunden Rektaszensionsänderung ergibt. Daraus geht hervor, daß man Längendifferenzen auf diese Weise nur mit etwa 30mal größerer Unsicherheit erhalten kann, als man imstande ist, die Mondrektaszension selbst zu bestimmen. Es wird also nur darauf ankommen, Verfahren aufzusuchen, die diese Rektaszension möglichst genau zu finden erlauben. Auf dieser Ueberlegung beruhen alle Längenbestimmungsmethoden, die die Beobachtung des Mondes benutzen.

Die Rektaszension des Mondes kann auf verschiedene Weise gefunden werden.

3f) 1. Mondkulminationen. Zur Bestimmung der Mondrektaszension beobachtet man an einem Durchgangsinstrument die Zeiten, zu denen der Mond und einige mit ihm auf nahezu gleicher Deklination stehenden Sterne den Meridian passieren. Hat man so die Rektaszensionsdifferenzen nach einer Sternzeituhr ermittelt, so ist es nur nötig, diese additiv oder subtraktiv, je nachdem die Sterne vor oder nach dem Mond den Meridian passierten, an die Rektaszensionen der betreffenden Sterne anzubringen, um aus jeder Sternbeobachtung einen Wert für die Rektaszension des Mondes zu erhalten. Diese Rektaszension des Mondes gilt dann für das Moment seines Meridiandurchganges am Beobachtungsort. Aus den Tabellen (Ephemeriden) findet man auch die Veränderung der Rektaszension des Mondes für die Zeit, welche zwischen den Kulminationen desselben an zwei Orten eintritt, die um 1 Minute in Zeit (15 im Bogenmaß) auseinander liegen, damit gibt eine einfache Division die Längendifferenz in dieser Einheit (vgl. den Artikel „Zeitmessung").

Bei derartigen Beobachtungen muß auf möglichst gleichmäßige Verteilung der Sterne zu beiden Seiten des Mondes Bedacht genommen werden, da nur so etwaige Unsicherheiten in der Kenntnis des Uhrganges und der Instrumentalfehler für das Resultat unschädlich gemacht werden können. Auch darf die Zwischenzeit zwischen den Meridianpassagen der Sterne und der des Mondes nicht zu groß sein, da sonst die Stabilität kleinerer Intsrumente, mittels deren

diese Art der Längenbestimmung an Feldstationen zumeist ausgeführt wird, nicht genügend verbürgt werden kann. Andere Fragen, welche alle Mondbeobachtungen betreffen und die auch hier von Einfluß auf die zu erlangende Genauigkeit sind, sollen später noch gemeinsam erörtert werden.

2. Sternbedeckungen. Der Mond wird auf seinem Lauf nicht allzu selten zwischen hellere Sterne und die Erde treten. In diesem Falle werden die Sterne hinter der Mondscheibe verschwinden und in diesen Momenten hat der betreffende Stern einen Abstand von dem Mondzentrum, der dem Mondradius entspricht. Kennt man diesen und außerdem den Ort des Ein- oder Austritts am Mondrand, d. h. den Winkel, welchen der entsprechende Mondradius mit dem Stundenkreis des Zentrums einschließt, so kann aus beiden Daten der Unterschied in der Rektaszension zwischen Mond und Sternzentrum berechnet werden. Ist für den Moment des Ein- oder Austritts die Ortszeit genau bekannt, so läßt sich aus der Mondephemeride wiederum durch Uebergang auf die gefundene Rektaszension des Mondes die Zeit des Nullmeridians und damit die Längendifferenz bestimmen. Diese Methode liefert sehr genaue Resultate, nur sind leider, die an einem Erdort wirklich beobachtbaren Bedeckungen hellerer Gestirne nicht häufig. Obgleich für einen beliebigen Erdort 150 bis 200 Bedeckungen von Sternen bis zur sechsten Größe im Jahre stattfinden, werden doch nur selten mehr als 20 wirklich beobachtet, abgesehen von Orten mit anhaltend klarem Wetter. Die Zeiten des Ein- und Austrittes finden aber für jeden Ort wegen der geringen Entfernung des Mondes von der Erde und der dadurch in hohem Maße eintretenden parallaktischen Verschiebung zu anderer absoluter Zeit statt. Es ist deshalb nötig, die beobachteten Momente erst auf diejenige Zeit zu reduzieren, die gemessen worden wäre, hätte sich der Beobachter am Erdzentrum befunden, um die Zeiten untereinander vergleichbar zu machen.

Dieser Umstand macht die schließliche Erlangung der Längendifferenz aus Sternbedeckungen rechnerisch etwas umständlich. Der Methoden zu dieser Rechnung gibt es mehrere, am bequemsten ist die von Bessel angegebene und später noch etwas verbesserte zu der die nötigen Formelsysteme in jedem astronomischen Jahrbuch (Ephemeriden-Sammlung) mit durchgerechnetem Beispiel zu finden sind. Hier kann auf diese Formel nicht näher eingegangen werden.

Ein Spezialfall der Bedeckung eines Sternes durch den Mond ist der, daß das bedeckte Gestirn die Sonne wird, also eine Sonnenfinsternis eintritt. Auch aus der Beobachtung der Berührung von Sonne und Mondscheibe lassen sich Längendifferenzen finden. Diese Phänomene sind früher vielfach zu solchen Bestimmungen benutzt worden, aber ihre Sicherheit ist nicht erheblich und außerdem treten sie so selten für einen bestimmten Erdort ein (etwa 2 bis 3 in zwei Jahren), daß ganz abgesehen von der Vereitelung ihrer Beobachtung durch bedeckten Himmel auf ihre Ausnutzung wenig zu rechnen ist. Außerdem ist auch die Ableitung der Resultate, da man es hier mit zwei nicht unendlich entfernten Himmelskörpern zu tun hat, und nur die Berührung der Ränder der Scheiben als die sie uns erscheinen beobachtet werden können, mit nicht unerheblichen rechnerischen Weitläufigkeiten verbunden. Die Beobachtung der Sonnenfinsternisse bietet heute im wesentlichen ebenso wie der Durchgang des Mondes durch den Schattenkegel der Erde erhebliches astrophysikalisches Interesse und zu diesem Zwecke werden die Verfinsterungen regelmäßig photometrisch oder spektrographisch beobachtet.

3. Monddistanzen. Eine andere, aber auch ähnliche Artder Rektaszensionsbestimmung des Mondes beruht auf der Messung der Distanz des Mondes von helleren Gestirnen mittelst eines Reflexioninstruments. An die Stelle des Mondradius tritt hier eine direkt gemessene größere Distanz. Dieses Verfahren ist aber erstens in der Praxis der Messung ziemlich schwierig und zweitens müssen diese Messungen sehr genau sein, da sonst die dabei begangenen Fehler etwa 25 bis 30mal vergrößert in das Resultat der Längenbestimmung eingehen (vgl. unter 5). Die Messung von Monddistanzen war früher auf Schiffen sehr geschätzt, da es dazu keiner festen Aufstellung des Instruments bedarf und durch geeignete voraus berechnete Tafeln die Ableitung der auf dem Erdmittelpunkt reduzierten Distanz und die Aufsuchung der dazu gehörigen Zeit des Nullmeridians sehr erleichtert wurde. Seit einigen Jahren geben aber die Jahrbücher, namentlich die letzteren Tafeln nicht mehr und es haben daher die Messungen von Monddistanzen nur noch historisches Interesse, wegen der vielen Arbeiten, die namhafte Astronomen zu ihrer zweckmäßigen Reduktion unternommen haben und die z. T. theoretisch von Bedeutung sind. Es kann aber hier auf weiteres darüber verzichtet werden.

4. Mondzenitdistanzen. Messungen der Zenitdistanz des Mondes können, da dadurch dessen Stundenwinkel gefunden wird, in Verbindung mit der zur Beobachtungszeit herrschenden Sternzeit ebenfalls zu Rektaszensionsbestimmungen des Mondes benutzt werden. Die Ausführung ist nur insofern an bestimmte Bedingungen geknüpft, als es erforderlich wird, diese Messungen von verschiedenen Fehlern freizumachen, mit denen Höhenmessungen außerhalb des Meridians mittelst Universalinstruments oder Höhenkreises behaftet sein können. Diese Bedingungen beziehen sich zunächst auf die Auswahl der für die Zenitbestimmung zu benutzenden Sterne, die sich in der Nähe des Mondes möglichst auf gleicher Höhe befinden

müssen. Wird die Zeitdistanz des Mondes nicht durch direkte Messung ermittelt, sondern durch Vergleichung mit einem nahestehenden Stern in der Weise, daß man die Differenz der Höhen beider Gestirne aus der Zwischenzeit bestimmt, in der die beiden Gestirne durch denselben Höhenparallel (Almukantar) hindurchgehen, so muß die betreffende Ortszeit auf andere Weise ermittelt werden, meist aus Durchgangsbeobachtungen im Meridian. Die erstere Methode pflegt man die, der absoluten Mondhöhen, die zweite als die der relativen Mondhöhen zu bezeichnen. Unter Voraussetzung besonders eingerichteter Instrumente liefert das letztere Verfahren die genaueren Resultate, da dasselbe von den Fehlern der Höhenmessung frei ist; allerdings ist der Aufwand an rechnerischer Arbeit größer.

Bei den letzterwähnten Methoden der Längenbestimmung tritt in erhöhtem Maße die Umständlichkeit der Rechnung hervor, die die geringe Entfernung des Mondes von der Erde bedingt, weil es deshalb nötig wird, alle Messungen erst auf den Mittelpunkt der Erde zu reduzieren, bevor sie mit den an anderen Orten ausgeführten vergleichbar werden. Wenn auch eben diese Nähe, d. h. die kurze Umlaufszeit, den Mond überhaupt erst für die Zwecke der Längenbestimmung brauchbar macht, so ist es doch z. B. bei der Berechnung der Mondkulminationen nicht nötig solche Reduktionen vorzunehmen, da diese Beobachtungen direkt im Meridian vor sich gehen, und dort kein parallaktischer Einfluß auf den Stunden-Winkel entsteht. Außer den scharfen Parallaxenrechnungen für Zenitdistanzmessungen kommt aber bei allen Mond- und auch Sonnenbeobachtungen die Reduktion von dem anvisierten Rand auf den Mittelpunkt der Scheibe hinzu. Der scheinbare Durchmesser ist aber wieder Veränderungen durch die Parallaxe, die von der Zenitdistanz und von der jeweiligen Entfernung des Mondes abhängen, unterworfen. Außerdem spielen die optischen Vorgänge im Fernrohr und physiologisch-persönliche Einflüsse eine Rolle, die ebenfalls die Auffassung des Randes und damit des Halbmessers bedingen. Aus alledem geht hervor, daß Mondbeobachtungen nur zu guten Resultaten führen können, wenn man wegen der angedeuteten Fehlerquellen die Anordnung der Beobachtungen so einrichtet, daß sie vor und nach Neumond und im Osten und Westen des Meridians ausgeführt werden. Nur genau zur Zeit des Vollmondes kann man beide Ränder des Mondes gleichzeitig beobachten (oberen und unteren, oder vorangehenden und nachfolgenden), was bei der Sonne natürlich jederzeit möglich ist. Deshalb kennt man den Durchmesser des Mondes bei weitem nicht mit derselben Schärfe als den der Sonne, und außerdem wird die oben angegebene Verteilung behufs der Elimination der Einstellungsfehler notwendig. In hohem Maße tritt diese Eigentümlichkeit bei den Sternbedeckungen, die sonst sehr gute Resultate ergeben, störend ein, da mit Ausnahme sehr heller Sterne immer nur die Erscheinungen am unbeleuchteten Mondrand und von diesem meist nur die Eintritte mit genügender Schärfe beobachtet werden können; am hellen Rande werden die Eintritte wegen des starken, überstrahlenden Lichtes des Mondes meist zu früh und die Austritte erheblich zu spät beobachtet werden. Das hat natürlich systematische Fehler in der daraus abgeleiteten Länge zur Folge. Da zur Zeit einer totalen Mondfinsternis der Mond immer noch recht gut sichtbar zu sein pflegt, eignen sich, die zu dieser Zeit stattfindenden Sternbedeckungen — die Dauer einer totalen Mondfinsternis kann bis zu 2 Stunden betragen — besonders zu Längenbestimmungen, zu Auffindung genauerer Werte des Mondradius oder solcher der Mondparallaxe. Die Fehlerquelle aber, die allen Mondbeobachtungen eigen ist und ihre Resultate oft sehr in Frage stellt, ist die Unsicherheit, mit der wir bis heute noch in der Lage sind, auf Grund der Theorie der Mondbewegung die Orte des Mondzentrums anzugeben, also die nötigen Vergleichs-Rektaszensionen für den Nullmeridian zu liefern. Die von Tobias Mayer, Plana, Hansen a. u. (17) angestellten theoretischen Untersuchungen über die Mondbewegung entsprechen heute nicht mehr den Beobachtungen und auch eine später von S. Newcomb im Jahre 1878 ausgeführte, zum Teil empirische Verbesserung der auf Grund der Hansenschen Tafeln gerechneten Mondorte stimmt nicht mehr genau (18). Es bleibt für die genaue Auswertung aller Mondbeobachtungen zum Zwecke der Längenbestimmung nichts anderes übrig, als solche immer mit nahezu gleichzeitig an festen Observatorien angestellten zu vergleichen, oder auf Grund längerer Reihen solcher, die für den betreffenden Zeitabschnitt gültigen speziellen Korrektionen der Tafelwerte abzuleiten und diese in Rechnung zu ziehen. Die nach Newcomb verbesserten Mondrektaszension können schon wieder bis über 0,6 Zeitsekunden falsch sein, das gibt in der Länge Fehler bis zu 4 Bogenminuten.

4. Einzelne Methoden der Ortsbestimmung zu speziellen Zwecken. 4 a) Ortsbestimmungen auf See. Standlinien-Methoden. An Bord eines Schiffes werden sich nur die Methoden der Ortsbestimmungen zur Ausführung eignen, die mit Hilfe von Instrumenten angestellt werden können, die keiner festen Aufstellung bedürfen. Das sind der Sextant und der Prismen- oder Spiegelkreis; abgesehen von den Mitteln, die unter den Begriff der terrestrischen Navigation fallen (Kompaß und Logg).

Es würden also Höhenmessungen über dem Meereshorizont (der Kimm) und Distanzmessungen in Frage kommen. Die letzteren sind, wie schon angeführt, heute nur noch von geringer Bedeutung, dagegen hat eine besondere Auswertung der Höhenmessung, die von den oben angegebenen Verfahren nicht theoretisch, wohl aber praktisch abweicht, weitgehende Verwendung gefunden. Das sind die sogenannten Standlinienmethoden, nach ihrem Erfinder „Sumnerlinien“ (19) genannt.

Das Prinzip ist sehr einfach und mag hier

noch in Kürze angeführt werden. Denkt man sich die Zenitdistanz (oder Höhe) eines Sternes gemessen, so wird sich der Beobachter sicherlich auf einem Kugelkreis befinden, der mit der gemessenen Zenitdistanz um den Ort auf der Erde beschreiben wird, für den das beobachtete Gestirn sich gerade im Zenit selbst befindet. Damit ist ein sogenannter geometrischer Ort für den Beobachtungspunkt gegeben. Wird nun gleichzeitig oder kurz darauf auch noch die Zenitdistanz eines zweiten Gestirns gemessen, so hat man einen zweiten solchen Kugelkreis, und es ist klar, daß sich der Beobachter auf einem der beiden Durchschnittspunkte befinden muß. Sind die Gestirne zweckmäßig ausgewählt — in nicht zu kleiner Zenitdistanz und mit einem Azimutunterschied von nahe 90° — so wird man über denjenigen der beiden Punkte, welcher für den gegebenen Fall in Betracht kommt, nicht zweifelhaft sein können, und die beiden Kreise werden sich nahezu rechtwinkelig schneiden, so daß der Durchschnittspunkt möglichst sicher bestimmt ist.

Die Auswertung solcher Messungen kann sowohl auf rechnerischem Weg (Zweihöhenproblem) als auch konstruktiv erfolgen. Das letztere wird im allgemeinen von den Seeleuten vorgezogen, da die zur See benutzten Karten in Merkatorprojektion dazu besonders geeignet sind. Setzt man an die Stelle der Kreise in der Nähe der Durchschnittspunkte deren Tangenten, so braucht man nur diese in geringer Ausdehnung in die Karten einzuzeichnen (Standlinien), um durch ihren Schnittpunkt den Beobachtungsplatz, also den Schiffsort, zu bestimmen. Notwendig ist zur praktischen Ausführung der Ortsbestimmung die Kenntnis der Zeit. Bei Beobachtungen an Bord wird unter Umständen noch eine kleine Korrektion berücksichtigt werden müssen, die dadurch bedingt wird, daß man beide Zenitdistanzmessungen meist nicht genau zur gleichen Zeit machen kann und daß sich während der Zwischenzeit der Schiffsort selbst verändert hat. Man nennt das die „Korrektion wegen Versegelung", sie muß besonders berücksichtigt werden, wenn auf dem Schiff die geographische Breite durch Mittagshöhe der Sonne und die Ortszeit am Vormittag oder Nachmittag auch aus Sonnenhöhen abgeleitet wird. Diese Methode, den Schiffsort zu bestimmen, ist die bei weitem gebräuchlichste und sie genügt heutzutage auch fast immer, da die Kursrechnung (der sogenannte Koppelkurs) bei den vorzüglichen nautischen Hilfsmitteln und der recht genauen Kenntnis der Strömungsverhältnisse völlig ausreicht, um den genäherten (gegißten) Schiffsort und den Fortgang der Fahrt mit ziemlicher Sicherheit angeben zu können. Alle komplizierten Methoden der Ortsbestimmung wendet der Seemann nur sehr selten und nur dann an, wenn die hier gegebenen aus irgendwelchen Gründen versagen (lange Zeit bedeckter Himmel, starkes Abkommen vom gewöhnlichen Weg durch Stürme oder Fahrt in ganz unbekannten Gewässern).

4b) Anwendung der Photographie zu astronomischen Ortsbestimmungen. Breitenbestimmungen. Längenbestimmungen. Auch mit Hilfe von photographischen Aufnahmen sind vielfach Versuche zur Bestimmung der geographischen Position gemacht worden und zwar z. T. mit gutem Erfolge. Abgesehen davon, daß man bei der Ausführung der Horrebow-Talcott-Methode (s. S. 557) an die Stelle der direkten Mikrometermessung die Fixierung des Unterschieds in der Zenitdistanz die photographische Platte gesetzt hat, ist es auch gelungen durch geeignete Instrumente direkt diejenige Stelle des Himmels auf der Platte ausmeßbar anzuzeigen, welche in einem gewissen Moment sich gerade im Zenit befindet. Da die Punkte des Himmels, welche genau den Zenit eines Ortes passieren, auch genau die Deklination besitzen müssen, die der geographischen Breite gleich ist, so kann auf diese Weise die letztere bestimmt werden.

Werden auf einer horizontal gelegenen photographischen Platte (20) durch ein senkrecht darüber angebrachtes Objektiv die dem Zenit nahestehenden Sterne abgebildet, so werden vermöge der täglichen Bewegung der Gestirne auf der photographischen Platte Spuren gezogen werden als Bild dieser Bewegung. Durch kurzes Abblenden des Objektivs können Zeitmarken in diesen Spuren hervorgebracht werden. Wird nun die photographische Platte mittels geeigneter Einrichtungen (vertikale Achse des Apparates) in ihrer Ebene um 180° gedreht, und wieder einige Minuten exponiert mit Zeitmarken und sodann die Exposition in der ersten Lage symmetrisch wiederholt, so wird man drei Spuren der zenitnahen Sterne erhalten, die etwa die Anordnung der Skizze zeigen. Figur 6. Durch Verbindung der Zeitmarken erhält man zwei Linien, welche denjenigen Punkt auf der Platte aufzufinden gestatten (durch Bestimmung ihrer Mitten, welcher dem Zenit entspricht). Wird dieser Punkt zu den Sternspuren durch mikroskopische Ausmessung in Beziehung gebracht, so kann man seinen Abstand von diesen Sternen und somit auch seine Deklination bestimmen, die dann gleich der geographischen Breite sein muß. In der Praxis macht man solche Aufnahmen nicht nur in diametraler Stellung der Platte, sondern in allen vier Quadranten, wodurch nicht nur die Breite, sondern auch eine Bestimmung der Zeit mit erhalten wird. Weiterhin sind natürlich Vorkehrungen zu treffen (durch Ablesen von Libellen), die die senkrechte Stellung des Apparates und die horizontale Lage der photographischen Platte verbürgen oder an die Messungsresultate entsprechende Verbesse-

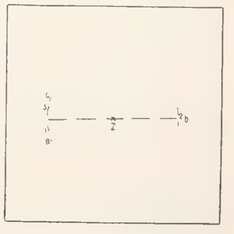


Fig. 6.

rungen anzubringen gestatten. Auch hat man den Vorschlag gemacht, ähnlich gebaute Apparate auf Flüssigkeiten schwimmen zu lassen (21), so daß dadurch die richtige Einstellung zur Vertikalen erzielt werden sollte. Diese Einrichtungen haben sich aber nicht zu bewähren vermocht, während Breitenbestimmungen in der ersterwähnten Anordnung mehrfach mit guten Resultaten ausgeführt worden sind.

Zu der Bestimmung der geographischen Länge hat man versucht, den Mond in seiner Stellung zu nahestehenden Gestirnen zu photographieren. Das gelingt auch mit einfachen Hilfsmitteln, wenn man bei nahezu nach dem Mond gerichteten Apparat die Sterne und den Mond kurze Spuren mit durch Abblenden hervorgebrachten Zeitmarken ziehen läßt. Da der Mond sehr hell ist, muß dessen Aufnahme in Form von Momentbildern zwischen die Sternpaare eingeschaltet werden. Die Ausmessung solcher Platten ist aber nicht ganz einfach und außerdem ist die Reduktion der Messungen selbst etwa gleichbedeutend mit jener, wie sie für die oben erwähnten Monddistanzen im Gebrauch waren. Bei allen photographischen Methoden der Ortsbestimmung ist die Vereinfachung durch die Aufnahme auf der Platte gegenüber dem visuellen Verfahren doch insofern nur scheinbar, als an Stelle der direkten Mikrometermessung oder Kreisablesung dann doch wieder die Ausmessung der Platte mittels mikrometrischer Einrichtungen geschehen muß. Daß sich allerdings eine bessere Ausnutzung günstiger klimatologischer Verhältnisse ermöglichen läßt, muß zugegeben werden, indem alle Messungsarbeit im Zimmer und in vielen Fällen auch von Hilfspersonal gemacht werden kann. Distorsionen der lichtempfindlichen Schicht oder dergleichen Beeinträchtigungen der Genauigkeit lassen sich dadurch umgehen, daß man in ihren Dimensionen genau bekannte ziemlich enge (5:5 mm) Liniennetze vor der Belichtung auf die Platte aufkopiert, so daß alle Distanzen nur immer auf kurze Entfernungen, auf die nächstgelegenen Linien, bezogen zu werden brauchen.

Die photographischen Methoden zu vervollkommnen und in ihrer Benutzung zu vereinfachen, ist die Wissenschaft gegenwärtig immer noch bemüht.

Literatur. *(1) Vgl. dazu die Mitteilungen bei* ***R. Wolf****, Handbuch der Astronomie, Bd. II, § 365. — (2) Dieses schon früher gebräuchliche Verfahren ist neuerdings wieder von Oberst v. Sterneck empfohlen und von ihm und auf Anordnung von Geh. Rat Helmert vom Kgl. Geodätischen Institut vielfach benutzt worden. — (3)* ***P. Horrebow****, Opera mathematico-physica 3, Havniae 1740 bis 1741. —* ***A. Talcott****, Report of the superintendent of the U. S. coast Survey for 1857, Washington 1858, S. 824fg. — (4)* ***F. Küstner****, Zur Bestimmung der Aberrationskonstante, Publk. der Kgl. Sternwarte Berlin. Beobachtungsergebnisse, III Bl. 1888. Briefwechsel zwischen Bessel und Humboldt, Juli 1844. — Die verschiedenen seit Einrichtung des regelmäßigen Breitendienstes vom Kgl. Geodät. Institut herausgegebenen Berichte (Internationale Erdmessung), in denen Th. Albrecht über den Verlauf der Polhöhenschwankungen regelmäßig berichtet. Auch die auszugsweisen Mitteilungen in den Astronomischen Nachrichten. — (5)* ***Th. Albrecht****, Formeln und Hilfstafeln für geographische Ortsbestimmung, IV. Auflage, Leipzig 1909, S. 104fg. —* ***L. Ambronn und Domke****, Hilfstafeln für geographische Ortsbestimmungen, Bl. 1909. Außerdem sind solche Tafeln in vielen der Lehrbücher der sphär. Astronomie in geringerer Ausdehnung enthalten. — (6)* ***P. Horrebow****, Basis astronomiae, Havniae 1795. Der Verfasser teilt dort die Beobachtungen Römers mit, dessen Beobachtungsmaterial größten Teils verloren gegangen ist. — (7)* ***F. W. Bessel****, Astron. Nachrichten, Nr. 3 (1825). Abhandlungen, herausgegeben von W. Engelmann, Bd. I, S. 317. —* ***J. F. Encke****, Bemerkungen über das Durchgangsinstrument im I. Vert. Berl. Astronomisches Jahrbuch, 1843. —* ***F. G. W. Struve****, Notice sur l'instrument du Passage de Repsold établi dans le I. Vertic. St. Pétersburg bull. scient. 10 (1842), S. 209. —* ***O. Struve****, Tabulae auxiliares etc. Petropoli 1868. — Auch die Hilfstafeln von Th. Albrecht enthalten zweckmäßige Formeln und Tafeln. — (8)* ***W. Förster****, Zur Theorie des Durchgangsinstruments. Berl. Astronomisches Jahrbuch, 1880 und 1882. Beiträge zur Ausgleichung der fundamentalen Ortsbestimmungen am Himmel. Astron. Abhandlungen, Ergänzungsheft zu den Astron. Nachr., Nr. 5, Kiel 1904. — (9)* ***J. C. Kapteyn****, Methode die Polhöhe möglichst frei von systematischen Fehlern zu bestimmen, Dublin 1884. In der nicht mehr erscheinenden Zeitschrift „Copernicus“. — (10)* ***J. Hartmann****, Die Vergrößerung des Erdschattens bei Mondfinsternissen, Leipzig 1891. — (11)* ***H. Seeliger****, Die scheinbare Vergrößerung des Erdschattens bei Mondfinsternissen. Vgl. Ak. München, Abh. 19, München 1898, S. 383. — (12) Die größten derartigen Zeitübertragungen sind die auf nahe 46° N. Br. zwischen dem Atlantischen Ozean und Fiume und zwischen Ofen, Wien und Bogenhausen b. München gemachten. — (13) Bezüglich der Längenbestimmung mittels des elektrischen Telegraphen ist besonders die schon mehrfach angeführte Sammlung von Formeln und Hilfstafeln v. Th. Albrecht zu vergleichen. — (14) Wegen der Ergebnisse der drahtlosen Telegraphie ist zu verweisen auf Astron. Nachr., Bd. 166, S. 338, (1904). — Publikationen der Internationalen Erdmessung herausgegeben von Helmert, Kgl. Geodät. Institut Potsdam. — (15)* ***H. G. van de Sande Bakhuijzen****, Compensation du réseau des longitudes. Neuchatel 1894. Auch abgedruckt in dem Generalbericht d. Intern. Erdmessung. — (16) Veröffentlichungen des Kgl. Geodät. Instituts, Nr. 48 (Telegr. Längenbestimmung, Potsdam, Jena, Gotha und Göttingen 1910), S. 49fg. — (17)* ***P. A. Hansen****, Tables de la Lune d'après la principe Newtonien de la gravitation universelle, Londres 1857. — (18)* ***S. Newcomb****, Researches of the motion of the Moon, Washington 1876 und 1878. — Mitteilungen aus den deutschen Schutzgebieten herausgegeben von*

A. v. Danckelman, 1905, S. 1[illegible]3 fg. und spätere Jahrgänge. — (19) Hierzu sind zu vergleichen die neueren Handbücher der Nautik, vor allen **F. Bolte,** *Handbuch der Schiffahrtskunde, Hamburg 1899, S. 99 fg. — (20)* **M. Schnauder,** *Geographische Ortsbestimmung mit der Zenitkamera, Astron. Nachr., Nr. 3678, Bd. 154, 1900. —* **K. Schwarzschild,** *Ueber photographische Ortsbestimmungen, Jahrbuch für Photographie. —* **C. Runge,** *Geogr. Länge und Breite, ihre Bestimmung auf photographischem Wege, Zeitschrift für Vermessungswesen, 1899, S. 94.*

L. Ambronn.

Atmosphäre.

Metereologie.

1. Bestandteile der Atmosphäre. Erforschung der höheren Schichten mittels Ballons und Drachen. Troposphäre und Stratosphäre. Zusammensetzung der oberen Luftschichten. Bedeutung und Mengen des Ozons, der Kohlensäure, des Staubes. Meteorologische Elemente. 2. Wind. Beziehungen zum Luftdruck und zur Temperaturverteilung. Ablenkung durch Erddrehung. Barisches Windgesetz. Gradient. Beaufort-Skala. Beobachtung der Piloten. Allgemeines Windsystem der Erde. Land- und Seewind (Monsun). Berg- und Talwind. Unter- und Oberwind. Täglicher Gang. Windfahne. Anemometer. 3. Temperatur. Bodentemperatur. Sonnenstrahlung und Bodenstrahlung. Solarkonstante. Zerstreuung und Absorption der Sonnenstrahlen in der Atmosphäre. Täglicher und jährlicher Temperaturgang. Mitteltemperatur abhängig von geographischer Breite (Zonen), Höhenlage, Meeresformen und Meeresströmen. Aenderungen des Golfstromes und nachfolgende Temperaturänderungen. Jahres- und Tagesschwankung der Temperatur abhängig von geographischer Breite, Verteilung des Landes und Wassers, Wald, Bodenbeschaffenheit, Bodenform, Jahreszeit, Bewölkung. Unperiodische Aenderungen. Veränderlichkeit. Temperatur der tieferen Bodenschichten. Wirkung der Schneedecke. Temperatur der oberen Luftschichten. Dynamische Erwärmung und Abkühlung. Kältewirkung des Bodens. Isotherme Schicht (Stratosphäre). Thermometeraufstellung. Schleuder- und Aspirationsthermometer. 4. Bewölkung. Wolkenbildung im aufsteigenden Luftstrom, kaum durch Luftmischung. Wassergehalt der Wolken. Trocken-, Regen-, Hagel-, Schneestadium der aufsteigenden Luft. Haufen-, Schicht-, Feder-, Regenwolken. Andere Wolkenformen. Wolkenhöhe. Wolkenspiegel. Sonnenscheinautograph. 5. Niederschlag. Tau, Reif, Beschlag, Glatteis, Rauhreif. Regen. Tropfengröße. Schnee. Graupeln. Hagel. Platzregen. Niederschlagshöhe und ihre räumliche Verteilung. Einfluß der Gebirge und des Waldes. Versuche künstlicher Regenerzeugung. Hagelschießen. Regenmesser. 6. Wetter. Böen. Hoch- und Tiefdruckgebiete, ihre Eigenschaften und Bewegungen. Guilbertsche Regel. Steige- und Fallgebiete. Wetterdienst.

1. Bestandteile der Atmosphäre. Unter dem Namen „Physik der Atmosphäre" faßt man neuerdings und nach v. Bezolds Vorgang die gesamten Erscheinungen des Klimas und des Wetters zusammen. Wenn auch der Boden aurch seine Temperaturänderungen und durch das Verhalten der in den Erdporen vorhandenen Luft einen wesentlichen Einfluß auf die Witterungserscheinungen ausübt, so ist doch als deren Schauplatz und Ausgangsstelle hauptsächlich die Atmosphäre anzusehen. Sie besteht aus Stickstoff und Sauerstoff, ferner Wasserstoff, Argon, Helium, Krypton, Neon, Xenon, und zu diesen in gleichbleibender Menge vorhandenen Gasen kommen noch stetig wechselnde Massen von Ozon, Wasserdampf, Kohlensäure, Ammoniak, schwefliger Säure, Schwefelwasserstoff u. a. Dichte und Menge der in der untersten Luftschicht vorhandenen Bestandteile außer Wasserdampf sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt (nach J. Hann Met. Zt. **20** 122—126 1903. W. Ramsay Nature **65** 161—164 1901—02 und Proc. Roy. Soc. London (A) **80** 599 1908. Die Dichte nach Landolt-Börnstein Physikalisch-chemische Tabellen).

Zusammensetzung der trockenen Luft am Boden.

	Dichte, bezogen auf Luft	Gewicht v. 1 Liter bei 0° und 1 Atmosphäre	Volumenprozente
		g	
Stickstoff	0,9673	1,2542	78,03
Sauerstoff	1,1053	1,4292	20,99
Argon	1,379	1,782	0,937
Kohlensäure . . .	1,529	1,9652	0,03
Wasserstoff	0,0696	0,0900	0,01
Neon	0,674	0,893	0,0123
Krypton	2,818	3,654	0,01
Helium	0,1382	0,1787	0,0004
Xenon	4,422	5,717	0,0011
Luft, trocken und kohlensäurefrei .	1	1,2928	100

Für Kohlensäure ist ein Durchschnittswert in der vorstehenden Zusammenstellung enthalten, der nicht für alle Gegenden zutrifft. Mehr noch ist der Wasserdampf örtlichen und zeitlichen Schwankungen ausgesetzt, so daß auch die prozentischen Mengen der anderen Luftbestandteile dadurch andere Werte erhalten können. Hann (a. a. O.) gibt hierfür folgende Zahlen an:

	Geograph. Breite		Aequator
	70°	48°	
	Volumenprozente		
Stickstoff	77,87	77,32	75,99
Sauerstoff	20,94	20,80	20,44
Argon	0,94	0,94	0,92
Wasserdampf . . .	2,22	0,92	2,63
Kohlensäure . . .	0,03	0,02	0,02

Wäre die Atmosphäre völlig in Ruhe und Gleichgewicht, dann würde jedes Gas für sich und unabhängig von den übrigen eine gesonderte Atmosphäre bilden, deren Gesamthöhe und deren Dichte in den einzelnen Höhen nur von der Gesamtmenge des betreffenden Gases und seinem spezifischen Gewicht sowie von der Temperaturverteilung abhinge. Diese Voraussetzung trifft aber für die unteren Luftschichten keineswegs zu, sondern hier finden beständige Strömungen statt, die namentlich auch in senkrechter Richtung verlaufen und eine stete Durchmischung der verschiedenen Schichten bewirken sowie außerdem Temperaturänderungen in der bewegten Luft erzeugen, aus denen für den Wasserdampf vielfache Aenderungen des Aggregatzustandes, Bildung und Verdampfen von Wolken und Niederschlägen, hervorgehen. Für diese unteren Schichten der Atmosphäre ist also die dem Gleichgewicht entsprechende Anordnung der verschiedenen Gase nicht möglich; dagegen hat man aus der Erforschung der höheren Schichten entnehmen können, daß die geschilderte Luftmischung sich nicht über den als „Wolkenzone“ bezeichneten untersten Teil der Atmosphäre hinaus erstreckt. Dieser Erforschung dienten die Beobachtungen, welche mittels bemannter Luftballons, Drachen und Registrierballons ausgeführt wurden. Den bemannten Fahrten sind in der Höhe durch Luftverdünnung und Sauerstoffmangel Grenzen gesteckt, und es wird wohl lebenden Menschen nie gelingen, höher zu steigen als Berson und Süring am 31. Juli 1901, die 10 800 m erreichten und bis zu 10 500 m noch Luftdruck und Temperatur (202 mm und — 40°) ablasen. Weiter hat man Registrierapparate mit Hilfe von Drachen in die Höhe zu senden vermocht, die an dünnem Stahldraht hochgelassen werden. Ist ein Drachen so hoch gestiegen, daß er eine größere Drahtlänge nicht mehr zu heben vermag, so befestigt man an das untere Ende des Drahtes einen zweiten Drachen, der nun ein weiteres Drahtgewicht hinaufhebt. Auf solche Art hat man 4 und 6 Drachen hintereinander emporgesendet, jeden mit Registrierapparaten versehen, und damit gleichzeitige Angaben über Temperatur, Feuchtigkeit und Wind aus den verschiedenen Höhen erlangt. Die größte durch Drachen erreichte Höhe dürfte am 5. Mai 1910 vom Mount Weather Observatory in Nordamerika mit 7265 m Seehöhe erzielt sein, Drachenaufstiege von 6 bis 7000 m sind dort wie am aeronautischen Observatorium in Lindenberg (Mark) nicht mehr selten. Noch größere Höhen zu erreichen, gelang mit frei fliegenden Registrierballons. Man verwendet dazu kleine Gummiballons, deren Größe und Wasserstoffüllung gerade zum Erlangen der gewünschten Höhe ausreichen. Dort platzt der Ballon infolge des verringerten äußeren Drucks und des demnach entstandenen inneren Ueberdrucks, und es entfaltet sich ein Fallschirm, der die Vorrichtung vor zu raschem Herabfallen hindert und die Registrierapparate gegen Beschädigung sichert. Diese Apparate pflegen als Rußschreiber oder auch mit photographischer Registrierung ausgeführt zu sein. Um den herabgefallenen Apparat leichter aufzufinden, bedient man sich wohl auch der „Tandems“, nämlich zweier Ballons, die durch eine Schnur verbunden sind, und deren einer in der Höhe platzt, während der andere von dem herabfallenden Registrierapparat mitgenommen wird und an seiner Schnur über dem Boden schweben bleibt, so daß man ihn von weitem sehen kann. Mit solcher Vorrichtung hat man von Uccle bei Brüssel am 5. November 1908 eine Höhe von 29 040 m erreicht.

Vermittels derartiger Untersuchungsmethoden gelang der von L. Teisserenc de Bort (Compt. rend. 134 987 1902) und fast gleichzeitig auch von R. Aßmann (Berl. Ber. 1902 495) geführte Nachweis, daß die Wolkenzone, charakterisiert durch vertikale Luftbewegungen und die hieraus entstehende Temperaturabnahme mit wachsender Höhe, nicht mehr als etwa die unteren drei Viertel der gesamten Luftmasse umfaßt und in unseren Breiten bis etwa 11 km, am Pol vielleicht bis 9, am Aequator bis 17 km hinaufreicht. Ueber dieser von Teisserenc de Bort als „Troposphäre“ bezeichneten untersten Schicht der Atmosphäre liegt die „Stratosphäre“ mit zunächst gleichförmiger oder ein wenig steigender und darüber wahrscheinlich langsam abnehmender Temperatur, ohne Mischung durch vertikale Ströme und daher von „blätterartiger Struktur“ (Teisserenc de Bort). Für diesen Teil der Atmosphäre kann daher die Anordnung der Bestandteile angenommen werden, die der Menge und Schwere der einzelnen Gase als Ruhelage entspricht, und es ist möglich, die Dichte der Gase für die verschiedenen Höhen zu berechnen. Auf Grund der neueren Ergebnisse von Registrierballons hat A. Wegener (Beitr. z. Phys. d. freien Atm. 3 225—232 1910) Mittelwerte für die Temperatur der verschiedenen Schichten angenommen, die zwar recht unsicher sind, aber auf die folgenden Angaben auch nur einen geringen Einfluß haben. Aus den für die unterste Luftschicht oben angegebenen Werten berechnet Wegener nun für die höheren Schichten folgende Volumenprozente:

km	Stickstoff	Sauerstoff	Argon	Wasserstoff
0	78,03	20,99	0,94	0,01
20	84,5	15,2	0,3	0,1
40	86,9	10,1	0,1	2,9
50	79,7	7,3	0,0	12,9
60	57,9	4,2	0,0	37,6
70	24,3	1,3	0,0	73,8
80	6,6	0,3	0,0	92,5
90	1,4	0,0	0,0	98,1
100	0,3	0,0	0,0	99,2
200	0,0	0,0	0,0	99,8

und fügt die durch Figur 1 wiedergegebene Zeichnung hinzu, in der bis zu 140 km Höhe die Volumenprozente der vier vorstehend genannten Gase dargestellt sind. Man sieht, wie in etwa 70 km Höhe sowohl Sauerstoff wie Stickstoff nur noch in

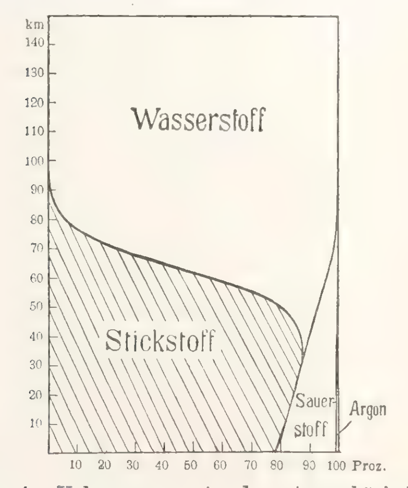


Fig. 1. Volumenprozente der atmosphärischen Gase in verschiedenen Höhen. Aus A. Wegener Medizinische Klinik, Wochenschr. f. prakt. Aerzte 1910 Nr. 40 Abb. 2 auf S. 9.

ganz geringen Mengen vorhanden sind, während der Wasserstoff vermöge seines geringen spezifischen Gewichtes eine sehr viel höher hinaufreichende Atmosphäre bildet und oberhalb 80 oder 90 km fast allein den Raum erfüllt. Von den in der letzten Tabelle nicht genannten Gasen hat in der Höhe nur Helium noch geringe Beträge, die übrigen sind in verschwindend kleinen Mengen vorhanden. Damit hängt es zusammen, daß die spektroskopische Betrachtung von Meteoren die Linien des Wasserstoffs und des Heliums zu zeigen pflegt.

Von den in wechselnden Mengen vorhandenen Gasen der Atmosphäre hat das Ozon zwar keine eigentlich meteorologische, wohl aber biologische Bedeutung, indem seine oxydierende Kraft die Zerstörung von Fäulnisprodukten fördern kann. Messungen von M. de Thierry (Compt. rend. 124 460 1897) ergaben für je 100 cbm Luft einen Ozongehalt von 2,3 bis 2,4 mg in Paris (Montsouris), 3,5 bis 3,9 mg in Chamonix am Montblanc (1050 m) und 9,4 mg auf den Grands Mulets (3020 m).

Die Kohlensäure ist am Boden im durchschnittlichen Betrage von 0,03 Volumenprozenten vorhanden, aber steten Schwankungen unterworfen. Auf die an der einzelnen Stelle vorhandene Menge wirken mancherlei örtliche Vorgänge. Bei allen Oxydationen wird Kohlensäure gebildet, und ihre Menge wächst also durch Verbrennung, Verwesung, durch Atmen der Menschen und Tiere, wie auch außerdem durch Emporsteigen von Grundluft aus dem Boden. Andererseits wird durch die Pflanzenatmung stets Kohlensäure verbraucht, namentlich unter Einfluß des Sonnenlichtes, also ist bei Sonnenschein und am Tage weniger Kohlensäure in der Luft vorhanden als bei trübem Wetter und nachts, in den Städten mehr als auf dem Lande, und in der Nachbarschaft großer Städte nimmt der Kohlensäuregehalt zu oder ab, je nachdem der Wind von der Stadt oder von draußen her weht. Ausgleichend wirkt dabei die Meeresfläche, insofern als zwischen der im Wasser gelösten und der darüber befindlichen freien Kohlensäure das Gleichgewicht sich nach jeder erheblichen Aenderung von selbst herstellt.

Von Bedeutung für das Wetter ist endlich noch die Menge der in der Atmosphäre enthaltenen, nicht luftförmigen Bestandteile, die man als Staub zu bezeichnen pflegt. Er setzt sich aus Körperchen mannigfachen Ursprungs zusammen, mineralische und Pflanzenteile sowie organische Keime bilden auf dem Lande den Staub, während über dem Meere kleine Salzteilchen als Reste von durch Seegang verspritzten und dann verdampften Wassertröpfchen die Luft erfüllen. Welche Rolle dergleichen Stäubchen als Kondensationskerne bei der Entstehung von Nebel und Wolken spielen, darüber ist der Artikel „Feuchtigkeit" zu vergleichen. Hier sei lediglich auf diese Einwirkung hingewiesen. Zur Zählung der in der Luft vorhandenen Staubteilchen hat J. Aitken (Proc. Roy. Soc. Edinb. 16 135—172 1888—89 und Trans. Roy. Soc. Edinb. 35 1—19 1890) ein leicht durchführbares Verfahren angegeben. Die zu untersuchende Luft wird in ein kleines verschlossenes Gefäß gebracht und durch eine damit verbundene Pumpe auf ein größeres Volumen ausgedehnt. Die hierbei entstehende Druckveränderung ist mit Abkühlung verbunden und bewirkt teilweise Kondensation der innen befindlichen Feuchtigkeit. Indem hierbei die Staubteilchen sich mit einer Wasserhülle beladen, sinken sie infolge dieser Belastung zu Boden und können mittels

einer passend angebrachten Lupe auf der mit Millimeterquadraten versehenen gläsernen Bodenplatte gezählt werden. So konnte G. Lüdeling (Veröffentl. d. Kgl. Preuß. Met. Inst. 1904 und 1908 und Ill. Aeron. Mitt. 7 321—329 1903) auf Inseln (Misdroy, Helgoland, Rotesand-Leuchtturm) beobachten, wie der Staubgehalt sich mit der Windrichtung änderte: auf dem Rotesand-Leuchtturm wurden durchschnittlich bei Nord-(See-)Wind 1795, bei Südost-(Land-) Wind 4660 Stäubchen im Kubikzentimeter gezählt. Dabei fielen die Tageszeiten größerer Sichtigkeit mit geringem Staubgehalt zusammen. Derselbe Forscher beobachtete gelegentlich einer Luftfahrt von Berlin aus bei der Abfahrt 4000, in 3325 m über Meer nur 450 Staubkerne im Kubikzentimeter und sah dann plötzlich deren Zahl auf 3600 wachsen, als der Ballon zur Mittagszeit (2 Uhr) die Stadt Spremberg überflog. Sobald der Ballon dem in der Mittagswärme aufsteigenden und mit städtischem Rauch und Staub erfüllten Luftstrom entronnen war, sank der Staubgehalt sogleich wieder und betrug in 4700 m Höhe nur noch 300 Kerne im Kubikzentimeter. Aitken (a. a. O.) verglich den Staubgehalt der Luft auf dem Rigi mit den Farben der untergehenden Sonne und fand kalte, klare und scharfe Beleuchtung bei wenig Staub, dagegen bei hohem Staubgehalt intensivere, wärmere und mildere Beleuchtung. Vielleicht sind auf derartige Beziehungen auch die vielen örtlichen Wetterregeln zurückzuführen, die an bestimmte Färbungen des Sonnenunter- oder -aufganges anknüpfen. Denn wenn einerseits die Menge und vielleicht auch die Art und Herkunft des in der Luft befindlichen Staubes von Einfluß auf bevorstehende Kondensation und Bildung von Wolken und Niederschlag ist, andererseits die Himmelsfärbung gleichfalls vom Staubgehalt abhängt, so wäre es wohl zu verstehen, daß auf Grund langjähriger Erfahrung sich örtliche Regeln herausgebildet haben, die ohne Kenntnis des Staubes und seiner Bedeutung eine unmittelbare Beziehung zwischen Himmelsfärbung und kommender Witterung aussprechen. Je nachdem das Wetter einer Gegend mehr von Westen oder mehr von Osten her beeinflußt wird, kann dann die Himmelsschau bei untergehender oder bei aufgehender Sonne für die Vorhersagung mehr in Betracht kommen. Selbstverständlich haben aber solche Regeln nur örtlichen Wert und gelten allein in der Gegend ihres Entstehens. Welche Staubmengen sich in der Luft befinden können, geht aus Wägungen hervor, die R. Aßmann (Festschr. d. Stadt Magdeb. gewidm. d. 57. Naturforschervers. 1884 210) in Magdeburg anstellte. An der dem Winde vorzugsweise ausgesetzten und daher weniger staubreichen Westseite der Stadt wurden in 31 m Höhe als Mittel zahlreicher Versuche 3 bis 4 mg Staub im Kubikmeter Luft gefunden und daraus berechnet, daß über der etwa 2 qkm großen Stadt in einer 50 m hohen Luftschicht mindestens 300 kg Staub schweben. Diese Menge wurde durch Regen auf ein Zehntel bis Zwanzigstel ihres Betrages vermindert.

Die Atmosphäre bildet nun den Schauplatz für das Auftreten und die Aenderungen der sechs „meteorologischen Elemente“, nämlich Luftdruck, Wind, Temperatur, Feuchtigkeit, Bewölkung und Niederschlag. Der aus ihrer Wechselwirkung hervorgehende Zustand der Atmosphäre über einem weiten Gebiet zu einem gewissen Zeitpunkt bildet das Wetter dieses Zeitpunkts; den durchschnittlichen atmosphärischen Zustand samt seinen durchschnittlichen Aenderungen während langer Zeit an einem Orte nennen wir das Klima dieses Ortes. Da Luftdruck und Feuchtigkeit in besonderen Artikeln behandelt werden, soll hier nur von den anderen Elementen ausführlicher die Rede sein.

2. Wind. Zunächst sei die Beziehung zwischen Luftdruck und Wind erörtert. Wäre die Erde in Ruhe (ohne Drehung) und überall gleich warm, so würde die Atmosphäre sie in völligem Gleichgewicht umgeben und lauter konzentrische Schichten bilden, in denen nach oben hin Dichte und Druck sowie die Temperatur abnähmen. Dabei gäbe es, weil ja ungestörtes Gleichgewicht herrschte, keinerlei Bewegung. In Wirklichkeit wird aber das Gleichgewicht fortwährend und an zahlreichen Stellen gestört, durch einseitige Sonnenstrahlung, verschiedene Erwärmung der Bodenflächen, Kondensation, Verdampfung und die hieraus entstehenden mannigfachen Druckänderungen, und indem eine jede solche Störung Bewegungen hervorruft, die auf Wiederherstellung des Gleichgewichts gerichtet sind, entstehen die Winde und die auf- und absteigenden Luftströme. Man hat darum nicht mit Unrecht gesagt, das ganze Wetter bestehe eigentlich aus Störungen, nämlich Störungen des atmosphärischen Gleichgewichts und deren Wirkungen. Ein Beispiel solcher Vorgänge liefert uns folgende Betrachtung. Eine Luftsäule (Fig. 2) werde vom Boden her derartig erwärmt, daß ihr unterstes Stück sich von der ursprünglichen Größe bis zu den durch gestrichelte Linien angegebenen Grenzen ausdehnt. Da diese Ausdehnung sowohl nach den Seiten als auch nach oben hin geschieht, ergibt sich daraus eine doppelte Aenderung des Luftdrucks. Die seitliche Ausdehnung hat zur Folge, daß der untere ausgedehnte Luftteil jetzt ein größeres

Bodenstück bedeckt und sein Gewicht über eine größere Fläche verteilt wie vorher; also wird am Boden der Druck sinken und kleiner werden als rundum. Die aufwärts gerichtete Ausdehnung hebt den darüber befindlichen, nicht erwärmten Teil der Luftsäule empor und bringt dessen einzelne Schichten samt den darin herrschenden Drucken in höhere Lage, so daß nun in diesem Luftteil an jeder einzelnen Stelle der Druck herrscht, der sich vorher an einer tieferen Stelle befand; also wird im oberen Teil der Luftsäule der Druck steigen und größer werden als rundum. Dadurch ist

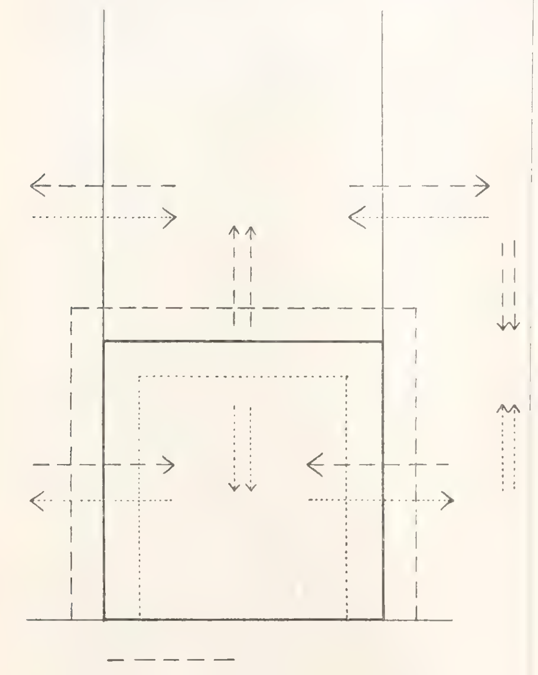


Fig. 2. Bodentemperatur und Wind.

unten wie oben das Gleichgewicht gestört, und es beginnen die ausgleichenden Luftbewegungen, wie sie durch gestrichelte Pfeile in der Figur angegeben sind: unten nach der Mitte hin, oben von innen heraus, außerdem innen aufsteigend und rundum absteigend. Der umgekehrte Vorgang würde ähnlich verlaufen, wenn nämlich der unterste Teil der Luftsäule durch Abkühlung vom Boden her auf ein geringeres Volumen gebracht wäre und nur den mit punktierten Linien umgrenzten Raum einnähme. Dann ruht dieser abgekühlte Luftkörper auf einem kleineren Bodenstück als vorher, sein Gewicht verteilt sich auf eine geringere Fläche und belastet diese stärker, so daß im unteren Teil der Luftsäule der Druck wächst und größer wird als rundum. Zugleich sinkt aber der obere Teil der Säule um so viel herab als der untere kürzer geworden ist, und es kommt jetzt oben an jede Stelle ein Druck, der vorher an höherer Stelle war und kleiner ist, also muß im oberen Teil der Druck sinken und geringer werden als rundum. Aus diesen Gleichgewichtsstörungen ergeben sich Bewegungen, wie sie die punktierten Pfeile der Figur andeuten: unten von innen heraus, oben nach der Mitte hin, außerdem innen absteigend und rund herum aufsteigend. In beiden Fällen, beim Erwärmen wie beim Abkühlen der untersten Luft, sahen wir Wirkungen auf Luftdruck und Wind, die viel höher hinaufreichten, als die Temperaturänderungen, welche doch die eigentliche Ursache des Ganzen bildeten. Vorgänge dieser Art finden in der Atmosphäre fortwährend statt; nicht gerade müssen solche Temperaturänderungen vom Boden ausgehen, sondern sie können durch Erscheinungen der Strahlung, der Kondensation und Verdampfung in allen möglichen Höhen entstehen und ihre Wirkung ausüben, und recht zahlreich sind auch die Fälle, in welchen ähnliche Störungen und unregelmäßige Druckverteilungen durch Luftbewegung erzeugt werden.

Charakteristisch für die soeben betrachteten Witterungserscheinungen ist das Auftreten eines Druckzentrums, d. h. einer Gegend, in der der Luftdruck entweder kleiner oder größer ist als rundumher. Von den barometrischen Tiefs und Hochs, die für unser Wetter eine so überaus große Bedeutung haben, unterscheiden sich die gedachten ruhenden Luftsäulen unserer letzten Ueberlegung durch einen wichtigen Umstand, der noch zur Vervollständigung berücksichtigt werden muß, nämlich die tägliche Erddrehung und ihre Einwirkung auf die Bewegungen der Luft. Es findet nämlich bei jeder auf der gedrehten Erde geschehenden horizontalen Bewegung eine durch jene Drehung erzeugte Ablenkung von der ursprünglichen Richtung statt, die auf der nördlichen Erdhälfte nach rechts, auf der südlichen nach links gerichtet ist. Will man diese Ablenkung ohne Rechnung herleiten, so kann etwa folgendermaßen verfahren werden. Wir betrachten zunächst nördliche und südliche Winde auf der nördlichen Erdhälfte. Im Norden einer Gegend herrsche höherer, im Süden geringerer Druck, und infolge dieser Gleichgewichtsstörung beginnt die Luft vom größeren zum kleineren Druck, also von Nord nach Süd zu fließen. Dabei kommt sie in niedrigere Breiten und erreicht Gegenden, die bei der täglichen Erddrehung einen längeren Weg (größeren Parallelkreis) zurücklegen und deshalb rascher gegen Ost fortschreiten, als es für die höhere Breite, aus der die Luft kommt, zutrifft. Diese hat aber bisher die

geringere west-östliche Geschwindigkeit ihrer Herkunftsgegend mitgemacht und behält aus Trägheit ihre geringere Geschwindigkeit solange bei, bis sie durch Reibung an der neuen Umgebung sich dieser angepaßt hat. Daraus ergibt sich eine Ablenkung der nach Süden geströmten Luft gegen West, also nach rechts. Wäre umgekehrt die ursprüngliche Bewegung von Süd nach Nord gerichtet und führte also die Luft in Gegenden höherer Breite, deren west-östliche Fortschreitungsgeschwindigkeit geringer ist, so würde diese Luft vermöge der größeren Geschwindigkeit ihrer Herkunftsgegend nach Osten hin von ihrer ursrpünglichen süd-nördlichen Bewegung abweichen, d. i. gleichfalls nach rechts.

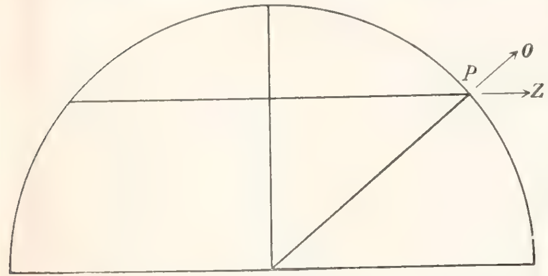


Fig. 3. Ablenkung des Ost- und Westwindes.

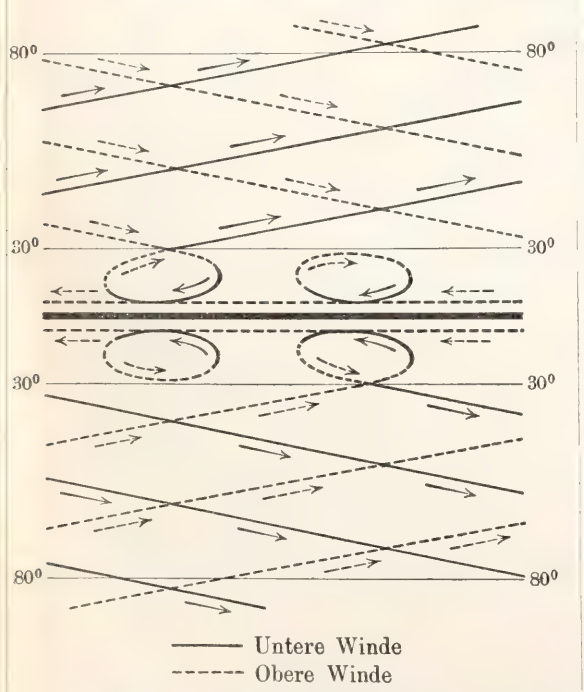


Fig. 4. Allgemeines Windsystem der Erde nach Hildebrandsson. Aus R. Börnstein, Leitfaden der Weltkunde, 2. Aufl. 1906 Fig. 26 auf S. 119.

Für die entsprechende Betrachtung der Ost- und Westwinde kommt die Zentrifugalkraft in Betracht. Ein Ort P (Fig. 3) bewegt sich samt der dem Boden aufliegenden Luft täglich von West nach Ost auf seinem Parallelkreis und erzeugt dadurch, wie bei jeder Drehung, eine Zentrifugalkraft, die vom Mittelpunkt der gekrümmten Bahn, hier des Parallelkreises, fort gerichtet ist. Für den betrachteten Punkt P hat diese aus der Erddrehung herrührende Zentrifugalkraft die durch den Pfeil Z bezeichnete Richtung, während der Pfeil O für einen in P befindlichen Beobachter die Richtung nach oben bezeichnet. Demnach ist für diesen Beobachter die Zentrifugalkraft schräg aufwärts gegen Süd gerichtet. Wenn keinerlei Bewegungsursache auf der Erde herrscht, befinden sich die Luftmassen und alle sonstigen beweglichen Gegenstände in Ruhe und Gleichgewicht unter dem gleichzeitigen Einfluß von Schwerkraft und Zentrifugalkraft. Eine Verstärkung der Zentrifugalkraft muß wirken, wie wenn eine neue, gegen Süd gerichtete Kraft hinzukäme, und eine Schwächung der Zentrifugalkraft, wie eine neue Kraft, die nach Nord gerichtet ist. Wenn nun die im Punkt P befindliche und täglich mit der Erde auf dem Parallelkreis herumgeführte Luft durch hohen Druck im Westen und niederen Druck im Osten veranlaßt wird, gegen Ost auf der Erdoberfläche fortzuschreiten, so eilt sie der Erddrehung voraus und gewinnt eine beschleunigte Bewegung auf dem Parallelkreis; damit ist dann eine Verstärkung der Zentrifugalkraft verbunden und also eine vermehrte Wirkung gegen Süd, durch die der ursprüngliche Westwind nach Süden, d. i. nach rechts, abgelenkt wird. Wenn dagegen im Westen niederer und im Osten hoher Druck auftritt und also Ostwind erzeugt, so ist diese Bewegung der Erddrehung entgegengesetzt, verringert die Zentrifugalkraft und wirkt ablenkend nach Norden, also wieder nach rechts. Ueberträgt man diese Betrachtung auf die südliche Erdhälfte, so können alle Einzelheiten auf ganz entsprechende Art zur Darstellung kommen und ergeben schließlich, daß dort eine jede Bewegung durch die Erddrehung nach links abgelenkt wird. Die mathematische Durchführung liefert den Ausdruck $2\,m\,v\,\omega \sin \varphi$ für jene nach rechts ablenkende Kraft, die infolge der Erddrehung auf eine Masse m ausgeübt wird, wenn diese sich mit der Geschwindigkeit v in beliebiger Richtung unter der geographischen Breite φ bewegt, wobei ω die Winkelgeschwindigkeit der Erddrehung ist und die nördliche Breite positiv, die südliche negativ gerechnet wird. Es ist also die Ablenkung vom Aequator gleich Null und nimmt von dort ab nach den

Polen hin zu, auf der nördlichen Halbkugel nach rechts, auf der südlichen nach links wirkend.

Bedenkt man, daß ohne Erddrehung der Wind zum Ausgleich des gestörten Druckgleichgewichts auf dem kürzesten Wege vom hohen zum niederen Luftdruck wehen würde, so ist nun die folgende, herkömmlich als barisches Windgesetz[1]) bezeichnete Regel verständlich: Der Wind weht so, daß er auf der nördlichen (südlichen) Erdhälfte den höheren Druck rechts (links) und etwas hinter sich, den geringeren Druck links (rechts) und etwas vor sich hat.

Die Wirkung der von der Erddrehung erzeugten ablenkenden Kraft ist ferner abhängig von der Reibung, indem diese verkleinernd auf die Ablenkung wirkt. Darum ist der Ablenkungswinkel, d. h. der Richtungsunterschied zwischen dem Wind und dem sogleich näher zu besprechenden Gradienten nicht bloß von der geographischen Breite abhängig, sondern auch von der Bodenbeschaffenheit und demnach an den einzelnen Orten von der Herkunftsrichtung des Windes. Dieser Winkel ist gering in niederen Breiten; größer auf dem Meere als auf dem Lande, weil die Luftreibung auf der glatten Wasserfläche klein ist; und größer, wenn der Wind aus bergiger oder bewaldeter Gegend herkommt, als bei Seewind.

Ist hiernach die Richtung des Windes auf Druckverteilung, geographische Lage und örtliche Bodenbeschaffenheit zurückgeführt, so können wir entsprechende Erwägungen auch für die Windstärke anstellen. Da der Wind die Wirkung der Druckverschiedenheit an benachbarten Orten ist, darf man zwischen dieser Ursache und der Wirkung nahe Beziehungen erwarten, und die Erfahrung bestätigt, daß der Wind um so stärker weht, je näher hoher und niederer Luftdruck beisammen liegen. Ist die Druckverteilung in der üblichen Weise durch Isobaren, nämlich Linien gleichen Luftdrucks, dargestellt, wie man es z. B. in den täglichen Wetterkarten der meteorologischen Anstalten findet, so steht auf den Isobaren senkrecht die Richtung, in der ohne Erddrehung der Wind wehen würde, weil dies der kürzeste Weg zwischen höherem und geringerem Druck ist. Die Druckänderung beim Fortschreiten in dieser Richtung gibt das Maß für die Stärke des daraus entstehenden Windes ab, und zwar bezeichnet man nach Th. Stevenson's (Journ. Scot. Met. Soc. 2 132 1867) Vorgang als barometrischen Gradienten den Unterschied im Barometerstand zweier Orte, deren Verbindungslinie auf den Isobaren senkrecht steht und die Länge eines Aequatorgrades (111 km) hat. Die Beziehung zwischen Gradient und Wind ist nicht unveränderlich. Wie der Ablenkungswinkel durch örtliche Verhältnisse beeinflußt wird, sahen wir soeben, und in ähnlicher Weise kann die Erfahrung begründet werden, daß die Windstärke, welche durch einen bestimmten Gradienten hervorgerufen wird, nicht immer die gleiche ist, sondern von der Bodenbeschaffenheit, der die Reibung entspricht, und von der Luftdichte abhängt, welch letztere wiederum durch Druck, Temperatur und Feuchtigkeit bestimmt wird. Darum kann man auch nur ganz ungefähr und mit Durchschnittszahlen angeben, welche Windstärken den verschiedenen Gradienten zu entsprechen pflegen; es sind das für Gradienten von 1, 2, 3, 4 mm Quecksilberdruck etwa die Windstärken 2, 4, 6, 8 nach der im folgenden erwähnten Beaufort-Skala. Die meteorologischen Stationen pflegen ihre Windbeobachtungen derartig aufzuschreiben, daß die Hauptwindrichtungen durch die Anfangsbuchstaben N. S. E. W bezeichnet werden, E für Ost nach dem englischen East, weil O sowohl Null wie auch im Französischen (Ouest) West bedeuten und zu Verwechselungen Anlaß geben könnte. Dazwischen liegen die bekannten übrigen Richtungen (NE, SSW usw.), die den ganzen Kreis in 16 Teile zerlegen. Die Stärke des Windes wird, wo nicht gerade besondere Meßapparate zur Verfügung stehen, nach bestimmten Anzeichen geschätzt; dabei hat sich erfahrungsmäßig eine sehr befriedigende Gleichmäßigkeit der verschiedenen Beobachter, namentlich der Seeleute, herausgestellt, indem die Zahlen der hierfür üblichen Beaufort-Skala, welche 12 verschiedene Windstärken annimmt, nach den äußeren Wirkungen des Windes geschätzt und an einer Anzahl von Beobachtungsstationen mit den Angaben der Meßapparate verglichen wurden. Die Einzelheiten enthält die Tabelle auf der folgenden Seite.

Aus dem Vorstehenden geht hervor, daß der Wind aus Unterschieden des Luftdrucks entsteht, und daß von deren Größe seine Stärke, von der Erddrehung seine Richtung beeinflußt wird. Wie hiernach die Winde der einzelnen Gegend entstehen, soll später

[1]) Das Gesetz wird vielfach auch nach dem holländischen Meteorologen Buys-Ballot genannt, neben dem indessen auch andere Forscher diese Erkenntnis förderten. Eine genaue Zusammenstellung der hierher gehörigen Literatur findet man bei S. Günther und Simon Dambeck, Sitzber. d. math.-phys. Kl. d. K. b. Akad. d. W. München **35** 381—426 1905, wo namentlich auch die Verdienste Lamberts und Galtons hervorgehoben werden.

Windstärke (Beaufort-Skala)	Bezeichnung	Geschwindigkeit Meter in der Sek.	Kennzeichen
0	Windstille	—	Vollkommene Windstille
1	Leiser Zug (sehr leicht)	1,7	Der Rauch steigt fast gerade empor.
2	Leicht	3,1	Für das Gefühl eben bemerkbar.
3	Schwach	4,8	Bewegt einen leichten Wimpel, auch die Blätter der Bäume.
4	Mäßig	6,7	Streckt einen Wimpel, bewegt kleine Zweige der Bäume.
5	Frisch	8,8	Bewegt größere Zweige der Bäume, wird für das Gefühl schon unangenehm.
6	Stark	10,7	Wird an Häusern und anderen festen Gegenständen hörbar, bewegt größere Zweige der Bäume.
7	Steif	12,9	Bewegt schwächere Baumstämme, wirft auf stehendem Wasser Wellen auf, die oben überstürzen.
8	Stürmisch	15,4	Ganze Bäume werden bewegt; ein gegen den Wind schreitender Mensch wird merklich aufgehalten.
9	Sturm (Voller Sturm)	18,0	Leichtere Gegenstände, wie Dachziegel, werden aus ihrer Lage gebracht.
10	Starker Sturm	21,0	Bäume werden umgeworfen.
11	Schwerer Sturm	etwa 30	Zerstörende Wirkungen schwerer Art.
12	Orkan	etwa 50	Verwüstende Wirkungen.

besprochen werden, hier werden wir zunächst die Bildung des Windsystems der Erde kennen lernen, das in großen Zügen aus den erwähnten Ursachen hervorgeht. Da die Druckverteilung wesentlich auf Temperaturverhältnisse zurückzuführen ist, so hat man schon lange angenommen, daß über der wärmsten Gegend der Erde ein aufsteigender Strom sein müsse, und daß die Luftmassen unten nach dieser wärmsten Gegend hin, oben von ihr fortströmen müßten. Da nun die Menschen nur die horizontale Luftbewegung, nicht aber die auf- oder absteigende als Wind empfinden und bezeichnen, nannte man die am Aequator liegende wärmste Gegend den Kalmengürtel und nahm dazu den Polarstrom an, der von beiden Polen her die untere Luft nach den heißen Tropen führt, und darüber den Aequatorialstrom, der in der Höhe die in den Kalmen aufgestiegenen Luftmassen wieder gegen die Pole treibt. Die aus der Erddrehung entstehende Ablenkung bewirkt, daß der am Boden für uns erkennbare Polarstrom auf der nördlichen Erdhälfte als Nordost-, auf der südlichen als Südostwind auftritt. Mit dieser einfachen Erwägung stimmt der wirklich vorhandene Wind bis zu etwa 30° nördlicher und südlicher Breite einigermaßen überein. Man hat aber sowohl durch theoretische Erwägungen namentlich William Ferrel's (The motions of fluids and solids on the Earths surface. Professional Papers of the Signal service VIII 1882), als auch durch zahlreiche Beobachtungen neuerdings eine andere, der Wirklichkeit besser entsprechende Vorstellung gewonnen. Die Beobachtungen bezogen sich zum Teil auf die Bewegung hoher Wolken, aus deren Höhe, Richtung und Geschwindigkeit die Luftbewegung der gleichen Höhenschicht entnommen wurde, und namentlich die Arbeiten des „Internationalen Wolkenjahres" 1896 bis 1897 haben hier durch die an zahlreichen Stationen gleichzeitig und nach vereinbartem Plane durchgeführten Wolkenmessungen viel neue Erkenntnis geschaffen. Außerdem hat man besonders in neuerer Zeit die Verfolgung von Piloten zum Studium der Luftbewegungen benutzt, nämlich kleiner, mit Wasserstoff gefüllter Gummiballons, die mit einem Theodoliten beobachtet werden. Aus den gleichzeitig abgelesenen Höhen- und Seitenwinkeln kann die Flugrichtung des Ballons in allen von ihm erreichten Höhen entnommen und daraus auf die Windrichtung jener Höhen geschlossen werden. Wird, wie in der Mehrzahl der Fälle, der Pilot nur von einer Stelle aus beobachtet, so ist die nachherige Aufzeichnung seiner auf die Erde projizierten Flugbahn freilich an die nicht ganz zutreffende Annahme geknüpft, daß seine Steigegeschwindigkeit während des ganzen Fluges unverändert den einmal angenommenen und vorher bestimmten Wert beibehält. In Wirklichkeit ändert sich während des Steigens eine Reihe von Einzelheiten: der Ballon dehnt sich aus, die umgebende Luft wird leichter, ihr Widerstand geringer, in der Sonne wird der Ballon warm, usw.; außerdem aber entgeht dem Beobachter auch die Wirkung etwa vorhandener auf- oder absteigender Ströme, und alle diese Umstände beeinträchtigen natürlich die Genauigkeit der Ergebnisse.

und die gleichzeitige Beobachtung des Theodoliten von 2 oder besser 3 Stellen aus würde zwar eine genaue und völlig einwandfreie Bestimmung ermöglichen, ist aber für die meisten Fälle zu umständlich und daher nicht immer durchführbar. Indessen hat man durch zahlreiche Pilotbeobachtungen die Wolkenmessungen ergänzt, namentlich wurden auch von Schiffen aus auf diese Art die Winde der Höhe durch H. Hergesell, L. Teisserenc de Bort, L. Rotch und andere erforscht, und als bisheriges Ergebnis aller dieser Untersuchungen kann das in Figur 4 nach H. Hildebrandsson (Rapport sur les observations internationales des nuages du comité international météorologique. I. Historique. Circulation générale de l'atmosphère. Upsal 1903) dargestellte allgemeine Windsystem der Erde bezeichnet werden. Ueber dem wärmsten Teil herrscht in den unteren Schichten der Atmosphäre Windstille und aufsteigender Strom, darüber Ostwind; dieser „Wärmeäquator" liegt durchschnittlich in etwa 10° nördlicher Breite und wandert im Jahreslauf mit der Sonne, so daß er während unseres Sommers mehr nördliche, während des Sommers der Südhemisphäre mehr südliche Lage hat. An diese „Kalmenzone" schließt sich beiderseits die Gegend der Passatwinde an, unten von Nordost und Südost gegen die Kalmen wehend, während darüber in nahezu entgegengesetzter Richtung die Gegenpassate fließen. Zwischen beiden liegt anscheinend eine Mittelschicht mit schwer zu deutender Bewegung, die auf der nördlichen Hemisphäre oftmals Nordwest, auf der südlichen Südwestwind zeigt. In der Nähe des Aequators beginnt der Gegenpassat in einer Höhe von über 2000 m, seine mittlere Höhe über den Tropen ist 2500 m, über Teneriffa (gegen 30° Nordbreite) noch einige hundert Meter höher. Die Passate sind der Schiffahrt seit lange bekannt und werden vermöge ihres regelmäßigen Wehens stets bei der Kursbestimmung berücksichtigt; sie reichen bis zu etwa 30° nördlicher und südlicher Breite. Ihnen schließt sich polwärts auf beiden Erdhälften der große Polarwirbel an, in den unteren Schichten geringere Regelmäßigkeit zeigend als die Passatregion, und die ganze gemäßigte und kalte Zone einnehmend. Die Hauptbewegung dieses Wirbels ist eine von West nach Ost gerichtete Drehung, wobei außerdem die Luftmassen unten gegen den Pol und oben gegen den Aequator strömen.

Während dies allgemeine Windsystem der Erde sich in den unteren Luftschichten der mittleren Breiten nur mit begrenzter Regelmäßigkeit erkennbar macht und durch vielerlei örtliche Einflüsse verändert wird, zeigen andererseits örtliche Zustände sich oftmals als Ursache sonstiger regelmäßiger Vorgänge bei der Windentfaltung. Namentlich die Verteilung von Wasser und Land übt eine deutliche Einwirkung auf die Temperaturverhältnisse und durch deren Vermittelung auf den Wind. Wie bei Besprechung der Wärmevorgänge in der Atmosphäre noch ausführlicher gezeigt werden soll, wird durch Zuführung oder Fortnehmen gleicher Wärmemengen im Wasser eine geringere Erwärmung oder Abkühlung erzeugt als in der gleichen Menge fester Bodenbestandteile, und die Folge dieser durch Unterschiede in der spezifischen Wärme, Strahlung und Aenderungen des Aggregatzustandes bewirkten Tatsache ist nun, daß überall der trockene Boden sich leichter erwärmt und abkühlt als die Oberfläche der Gewässer, und daß demnach das Binnenklima größere Temperaturschwankungen als das Seeklima zeigt, im Innern der Länder der Sommer und der Tag wärmer, der Winter und die Nacht kälter werden als bei sonst gleichen Verhältnissen auf der See und auf Inseln. Wenn nun nahe beisammen Land- und Wasserflächen dieser verschiedenen Einwirkung unterworfen sind, ergibt sich daraus dieselbe Druckverteilung und Luftbewegung, wie sie vorher (Figur 2) erwähnt wurde: unten strömt die Luft von der kälteren zur wärmeren Seite, und es entsteht, da mit der Jahres- oder Tageszeit auch der Sinn des Temperaturunterschiedes wechselt, der in vielen Küstengegenden wohlbekannte Wechsel von Land- und Seewind. Solche Winde, die auf den jahreszeitlichen Temperaturwechsel zurückzuführen sind, führen den Namen Monsune. Sie sind teilweise so stark und legen so große Wege zurück, daß ihre Ablenkung durch Erddrehung leicht erkannt werden kann. Als ein Beispiel seien die Monsune von Süd- und Ostasien erwähnt. Im Winter aus dem kälteren Land kommend wehen sie in Indien aus Nordost, in China und Japan aus Nordwest; im Sommer dagegen sind es Seewinde, die an der indischen Küste vorwiegend aus Südwest, an der Ostküste aus Südost kommen. Aehnliche Winde kennt man auch in anderen Küstengegenden und kann sie in derselben Art deuten. Da ihr Ursprung vom Boden ausgeht, reichen sie nur bis zu geringen Höhen hinauf.

Geringere Ausdehnung und Stärke haben die im Tageslauf des Wetters auftretenden Land- und Seewinde, deren Entstehungsweise im übrigen genau die gleiche ist. Die nächtliche Abkühlung ist auf dem Lande stärker und erzeugt demnach Landwind, während der höheren Tagestemperatur des Landes der vom kälteren Wasser kommende Seewind entspricht. Für die deutsche Ost-

seeküste hat neuerdings Max Kaiser (Diss. Halle 1906) diese Winde genauer untersucht und die Eintrittszeit des Seewindes örtlich wechselnd zwischen 8 Uhr früh und 2 Uhr mittags gefunden; aus Schiffsbeobachtungen ergab sich dabei, daß der Seewind bei günstigen Verhältnissen noch in $7\frac{1}{2}$ bis 9 km Abstand von der Küste erkennbar war, der Landwind bis 15 km weit.

Ebenfalls auf Temperaturunterschiede zurückzuführen ist der in vielen Gebirgstälern regelmäßig auftretende Berg- und Talwind. Wird durch die Sonne der Boden der Bergwände erwärmt, so bildet sich durch Wärmeleitung eine dem Boden überall benachbarte und seine Formen begleitende Schicht warmer und darum leichter Luft, deren Wirkung ein vom Tal gegen den Berg wehender Tagwind ist; wird umgekehrt durch nächtliche Abkühlung der Bergwände eine ebenso gestaltete Schicht kalter, schwerer Luft erzeugt, so ruft diese einen vom Berg gegen das Tal wehenden Nachtwind hervor.

Eine örtliche Beeinflussung des Windes zeigt sich endlich bei unregelmäßig gestaltetem Boden. Ein jeder Berg oder Hügel zwingt den Wind zum Aufsteigen und erzeugt über dem Gipfel eine vermehrte Geschwindigkeit der Luftmassen, die durch den Berg auf einen schmaleren Weg zusammengedrängt werden und hier also rascher dahinfließen, als sie es auf gerader, horizontaler Bahn täten. Dies ist den Luftschiffern wohlbekannt, und ebenso auch das Umgekehrte: wer mit dem Ballon über ein Gewässer fährt, muß durch Ballastwerfen das sonst eintretende Sinken verhindern, denn das Wasser steht oder fließt im tiefsten Teil des Geländes, und die Bahn des Windes wird beim Ueberschreiten der Vertiefung abwärts gebogen. Wahrscheinlich wird diese Wirkung in vielen Fällen durch Temperatur-, namentlich Strahlungseinflüsse, verstärkt.

In nahem ursächlichem Zusammenhang stehen miteinander die täglichen Aenderungen der Windstärke und Windrichtung sowie die Verschiedenheiten des Windes, der in den untersten und den darüberliegenden Luftschichten weht. Da der Boden mit seinen Unebenheiten die Luftbewegung hindert, entfaltet sich nach oben hin der Wind stärker und rascher. Da nun aber der rascher wehende Wind auch durch Erddrehung stärker abgelenkt wird, sehen wir über dem Boden und so hoch hinauf, als der Einfluß der Bodenreibung noch merkbar ist, den Wind oben im Sinne jener Ablenkung nach rechts gegen die unterste Strömung abweichen. Höher hinauf ist, wiewohl aus anderen Gründen, die Rechtsablenkung des Oberwindes gleichfalls oft zu bemerken und tritt viel häufiger als das Gegenteil auf. Aus der größeren Stärke des Oberwindes in Verbindung mit dem täglichen Temperaturgang ergibt sich ferner auch der tägliche Gang der Windstärke. Die Temperatur hat, wie nachher ausführlicher gezeigt werden soll, eine einmalige Schwankung am Tage, die kälteste Zeit trifft am frühen Morgen etwa mit Sonnenaufgang zusammen, die wärmste Tageszeit liegt etwa zwischen 2 und 3 Uhr nachmittags, und den Temperaturänderungen der Luft gehen solche des Bodens zeitlich und ursächlich voraus. Wenn nun gegen Morgen der Boden und die unterste Luftschicht erkalten und die Luft dabei immer schwerer wird, dann bleibt sie unten; wenn dagegen mittags die Erwärmung vorschreitet, so wird die untere Luft leichter und beginnt über die minder erwärmten Schichten emporzusteigen, während gleichzeitig kältere Luft von oben herabkommt. Die vertikal bewegten Luftmassen nehmen dabei ihre horizontale Bewegung mit sich, und so geschieht es, daß mittags zur Zeit des stärksten Luftaustausches zwischen oben und unten auch die stärkste horizontale (Wind-) Bewegung von oben herabkommt, während in der Frühe die untere Luft mit ihrer geringeren Windstärke am Boden verbleibt. Hiernach ist es verständlich, wenn die Beobachtungsstationen in der Nähe des Bodens die geringste Windstärke frühmorgens, die größte mittags zwischen 2 und 3 Uhr finden. Als Ergänzung und Bestätigung dieser Auffassung darf erwartet werden, daß die erwähnten Unterschiede geringer auf dem Meere und auf einzeln liegenden Inseln auftreten, weil

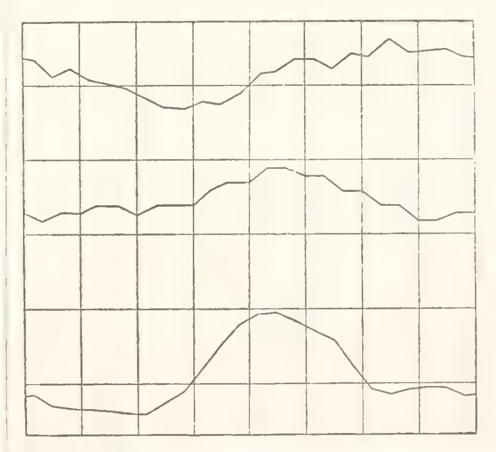


Fig. 5. Täglicher Gang der Windgeschwindigkeit in Wien, Bermudas und Sonnblickgipfel. Aus R. Börnstein, Leitfaden der Wetterkunde 2. Auflage 1906. S. 123 Fig. 27.

dort die Luftreibung an der glatten Wasserfläche kleiner und die Windbewegung verschiedener Höhen darum minder verschieden ist. Und ferner ist zu erwarten, daß auf Bergen die täglichen Aenderungen der Windstärke umgekehrt verlaufen, wie in der Ebene, weil dort frühmorgens die ungeminderte Windgeschwindigkeit der Höhe herrscht, mittags dagegen die langsamer bewegte untere Luft teilweise heraufsteigt. In der Tat trifft dies zu, wie Figur 5 mit Windbeobachtungen von Wien, von den Bermudasinseln und dem Sonnblickgipfel (3100 m hoch) zeigt.

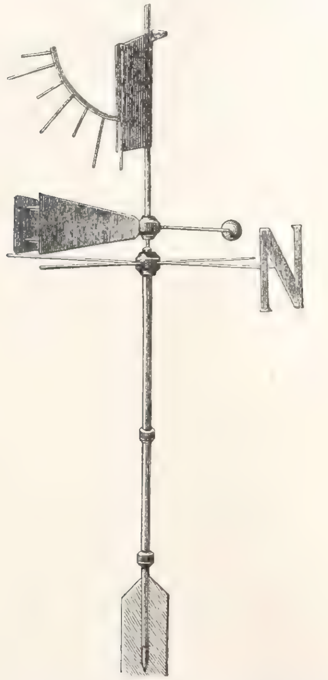


Fig. 6. Windfahne und Stärketafel. Aus dem Preisverzeichnis von R. Fuess in Steglitz und R. Börnstein, Leitfaden der Wetterkunde S. 124 Fig. 28.

Zur Beobachtung und Messung des Windes dienen Windfahne, Stärketafel, Schalenkreuz und sonstige Anemometer. Die *Windfahne*, die uns die Richtung der Luftbewegung angeben soll, muß so leicht und beweglich sein, daß sie auch wirklich selbst bei schwachem Wind jeder Richtungsänderung folgt. Die als architektonische Zierde auf den Dächern und Türmen vielfach angebrachten metallenen Wetterfahnen sind daher meistens wenig zur Beobachtung geeignet; häufig ist ihre Masse nicht ganz gleichmäßig verteilt und dadurch die ohnehin geringe Beweglichkeit noch vermindert, oder es steht die Stange nicht genau aufrecht und die Fahne „hängt“ nach einer Seite, so daß die betreffende Windrichtung bei schwachem Winde jedesmal einzutreten scheint. Ein einfacher Wimpel ist eigentlich die ideale Windfahne. In Figur 6 ist eine leichte Windfahne dargestellt, der zur Erkennung der Windgeschwindigkeit eine *Stärketafel* beigefügt ist. Das ist eine rechteckige, um die obere Kante drehbare Holzplatte, welche mit der Fahne so verbunden ist, daß sie deren Drehung mitmacht und sich stets senkrecht zur jeweiligen Windrichtung einstellt. Je nach der Windstärke wird die Platte mehr oder minder weit aus der senkrechten Lage herausgedrückt und gibt durch ihre Stellung die Windstärke an. Viel benutzt wird auch das *Schalenkreuz*, welches unabhängig von der Windrichtung die Geschwindigkeit der Luftbewegung durch die Schnelligkeit seiner Drehung angibt (Figur 7). Auf die äußere Seite der halbkugeligen Schalen wirkt der Winddruck schwächer als auf die hohle Seite, und erzeugt so die Drehung. Vermittels eines Zählwerks kann die Zahl der in einer gewissen Zeit ausgeführten Drehungen abgelesen und registriert werden.

3. Temperatur. Wir wenden uns nunmehr zum nächsten der zu besprechenden meteorologischen Elemente, der *Temperatur*; und zwar ist es nicht die Lufttemperatur, welche vorerst in Betracht kommt, sondern als ursächlich voranstehend die Temperatur des Bodens, weil, wie sich sogleich zeigen wird, die unteren Luftschichten, in denen wir leben und unser Wetter sich abspielt, ihre Wärme und Kälte von unten her empfangen. Der Boden aber empfängt beides

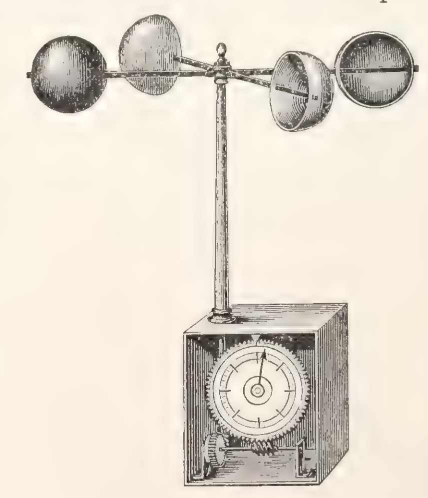


Fig. 7. Robinsons Schalenkreuz. Aus R. Fuess Preisverzeichnis und R. Börnstein, Leitfaden der Wetterkunde S. 125 Fig. 29.

sowohl von unten wie von oben. Die Vorgeschichte des Sonnensystems weist nach der Hypothese von Kant (Laplace) eine Zeit auf, in der die Erde als feurigflüssiger Körper etwa der Sonne in ihrem heutigen Zustand glich. Die seither wirksam gewesene Abkühlung fand naturgemäß von der Oberfläche aus statt und geschah durch Ausstrahlung in den Weltenraum, während von innen her beständig Wärme durch Leitung gegen die kälter werdende Oberfläche nachströmte. Wegen der Langsamkeit der Leitung konnten nun die von innen gegen die Oberfläche geführten Wärmemengen nicht völlig die von der Bodenoberfläche ausgestrahlte Wärme ersetzen, die Oberfläche erkaltete nicht nur an sich, sondern auch im Vergleich zu den tieferen Schichten, und indem dieser Zustand noch heute andauert, sehen wir die Bodentemperatur nach unten hin wachsen. Im Durchschnitt ist also die Oberfläche kühler und empfängt von unten her geleitete Wärme; in den wärmsten Stunden des Tages aber und namentlich in den Mittagsstunden der warmen Jahreszeit ist vermöge der Sonnenstrahlung die Temperatur der obersten Bodenschicht vorübergehend höher als die der tieferen Schichten, und dann ist umgekehrt die Wärmeströmung nach oben gerichtet. Die zweite Wärme- und Kältequelle für die Bodenfläche ist die Strahlung. Bei Tage sendet die Sonne in Form gestrahlter Energie dem Boden Wärme zu, und beständig strahlt der Boden Wärme gegen den Himmel aus. Dieser Strahlungsverlust steigt und sinkt mit der Oberflächentemperatur des Bodens, und abwechselnd im Tageslauf überwiegt die Ein- oder die Ausstrahlung und äußert sich dies Ueberwiegen im Steigen oder Sinken der Temperatur. Aus dem Zusammenwirken dieser sämtlichen Vorgänge in Leitung und Strahlung ergibt sich die wirkliche Temperatur der Bodenoberfläche.

Man hat versucht, die wärmende Kraft der Sonne messend zu bestimmen, indem man die Stärke ihrer Strahlung am Boden und auf Bergen verschiedener Höhe feststellte. Dabei sollte auch der Betrag der zugestrahlten Wärme ermittelt werden, der in der Atmosphäre zurückgehalten wird, um schließlich die volle Strahlungswärme zu finden, wie sie an einem außerhalb der Atmosphäre liegenden Punkte wirksam sein müßte. Die so erhaltene Zahl heißt Solarkonstante und gibt die Wärmemenge an, die eine zur Sonnenstrahlung senkrechte Fläche von 1 qcm Größe außerhalb der Atmosphäre in einer Minute empfängt. Solche Messungen sind von zahlreichen Forschern zu verschiedenen Zeiten und auf verschiedenen Bergen und sonstigen Beobachtungsstationen ausgeführt und ergeben einen mittleren Wert von etwa 2,1 Grammkalorien (deren eine 1 g Wasser um 1° erwärmt). Doch ist die Solarkonstante zeitlichen Aenderungen unterworfen, die vielleicht mit wechselnder Durchlässigkeit der Sonnenatmosphäre zusammenhängen; nicht ganz ausgeschlossen sind auch Störungen der Messung durch örtlich veränderte Durchlässigkeit der Erdatmosphäre infolge vulkanischen Staubes oder dergleichen. Die so ermittelte Wärmemenge, die die Erde jährlich von der Sonne empfängt, vermag eine die Erdoberfläche bedeckende Eisschicht von etwa 35 m zu schmelzen.

Von dieser Wärme gelangt aber nur ein Teil bis zum Erdboden, ein sehr erheblicher Betrag wird in der Atmosphäre zerstreut oder absorbiert. Die Zerstreuung besteht in Aenderungen der Strahlenrichtung, und zwar sowohl durch Brechung, als auch durch Zurückwerfung und Beugung an den Grenzen verschieden dichter, warmer oder feuchter Luftmassen, an der Oberfläche der in der Atmosphäre befindlichen Staub-, Wasser-, Eisteilchen usw. Indem die von der Sonne kommenden und in die Atmosphäre eintretenden Strahlen solchen Einflüssen begegnen und nach allen möglichen Richtungen immer von neuem abgelenkt werden, geschieht es, daß die Strahlung dann auch aus allen möglichen Richtungen zu uns gelangt. Käme das Licht nur auf dem kürzesten Wege geradlinig von der Sonne in unser Auge, so müßte für uns die helle Sonne am schwarzen Himmel erscheinen, da die Himmelsfläche ja kein eigenes Licht aussendet. Weil aber die Zerstreuung des Sonnenlichtes in der Atmosphäre stattfindet, und weil diese Zerstreuung vorwiegend die kurzwelligen (blauen) Strahlen betrifft, so sehen wir das Himmelsgewölbe hell, und zwar mit blauer Farbe. Scheint die Sonne geradlinig durch Nebel oder Staub, so sehen wir sie rot, denn ihre blauen Strahlen werden teilweise zerstreut und in dem Rest des gerade hindurchgehenden Lichtes überwiegen die langwelligen (roten) Strahlen.

Von der Absorption werden diejenigen Strahlen betroffen, welche vermöge ihrer Wellenlänge (Farbe) die Luft nicht durchdringen können. Man kann in dieser Hinsicht die Luft mit irgendeinem anderen durchsichtigen Körper vergleichen, z. B. mit farbigem Glas, um zu verstehen, daß die Durchsichtigkeit immer nur für bestimmte Strahlenarten (z. B. in grünem Glas für Grün) besteht, während andere Strahlen in dem für sie undurchlässigen Körper zurückgehalten werden und an ihn ihre Energie abgeben, d. h. den absorbierenden Körper erwärmen. Wenn aber die in die Atmosphäre eindringenden Sonnenstrahlen bereits in den obersten

Luftschichten der Bestandteile beraubt sind, welche durch Luft absorbiert werden, so bleibt für eine etwaige Absorption in den tieferen Luftschichten wenig übrig; diese nehmen also auch nur sehr wenig Wärme von den hindurchlaufenden Sonnenstrahlen auf, und namentlich die bodennächsten Luftmassen, deren Temperatur wir zu messen pflegen, empfangen von der Sonnenstrahlung unmittelbar fast gar keine Wärme, sondern ihre Temperatur erhöht sich erst durch Vermittelung des Bodens, der mit seiner, von derjenigen der Luft völlig verschiedenen Absorptionsfähigkeit große Wärmemengen aus der Strahlung aufnimmt und sie auf dem Wege der Leitung langsam an die ihm nächsten Luftschichten abgibt. Umgekehrt wirkt eine durch Ausstrahlung hervorgerufene Abkühlung des Bodens gleichfalls unter Vermittelung von Wärmeleitung ab-

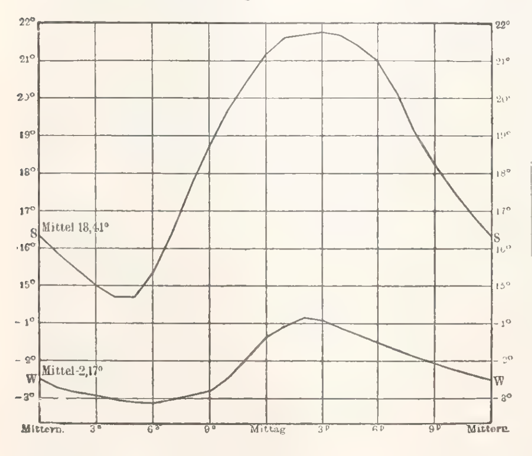


Fig. 8. Täglicher Gang der Temperatur in Berlin im Januar (W) und Juli (S). Aus R. Börnstein, Leitfaden der Wetterkunde 1906 S. 6 Fig. 1.

kühlend auf die unterste Luftschicht, und auch durch Strahlung von der Luft gegen den erkalteten Boden kann an diesen eine gewisse Wärmemenge übergehen.

Aus den vorstehenden Erwägungen ist ersichtlich, daß die Lufttemperatur wesentlich von der Bodentemperatur bedingt ist und durch Wärmeleitung von dieser beeinflußt wird. Da nun die Leitung der Wärme ein ziemlich langsames Fortschreiten bedeutet, so ist damit auch zu verstehen, daß die Temperaturänderungen der Luft denjenigen des Bodens nicht nur ursächlich, sondern auch zeitlich folgen. Hiernach können wir nun den täglichen Temperaturgang leicht verstehen, wie er für Berlin in Figur 8 dargestellt ist. Vom Untergang der Sonne ab erhält der Boden keine Strahlung mehr, und seine sowie die Lufttemperatur sinken. Dies dauert so lange, bis die aufgehende Sonne kräftig genug strahlt, um dem Boden mehr Wärme zuzuführen, als er durch Ausstrahlung gleichzeitig verliert, und die Temperatur wird also während der ganzen Nacht immer niedriger, bis etwa zur Zeit des Sonnenaufgangs die kälteste Zeit des ganzen Tages eintritt. Daß dies nicht erst etwas später geschieht, ist vielleicht auf eine gewisse „Wärmedämmerung" zurückzuführen. Von nun an wächst die von den steiler werdenden Sonnenstrahlen zugeführte Wärmemenge und mit ihr die Temperatur, bis zwischen 2 und 3 Uhr mittags zur wärmsten Tageszeit die vom Boden ausgestrahlte Wärme der zugestrahlten Menge zunächst gleichkommt und sie dann mit sinkender Sonne überwiegt.

Eine ähnliche Form wie für den täglichen Temperaturgang zeigt die Kurve für den jährlichen Gang, nämlich eine einmalige Schwankung, die auf der Nordhemisphäre die höchste Temperatur im Juli, die niedrigste im Januar erkennen läßt, während auf der südlichen Erdhälfte die Extremwerte umgekehrt auf Januar und Juli fallen.

Für die mittlere Jahrestemperatur eines Ortes ist in erster Linie maßgebend die geographische Breite. Zwar steht für jeden Ort im Laufe des ganzen Jahres die Sonne ebenso lange über als unter dem Horizont, aber ihre Mittagshöhe und die Steilheit der zum Boden gelangenden Strahlung sind durchschnittlich größer im niederen, kleiner in hohen Breiten, so daß die dem Boden im ganzen Jahre zugestrahlte Wärme mit wachsender geographischer Breite abnimmt. Man unterscheidet bekanntlich: die heiße Zone, zwischen den Wendekreisen mit $23\frac{1}{2}^0$ Nord- und Südbreite, in der die Sonne das Zenit erreichen kann; die gemäßigten Zonen zwischen Wende- und Polarkreisen ($66\frac{1}{2}^0$), in denen die Sonne das Zenit nie erreicht, aber täglich auf- und untergeht; und die kalten Zonen, je von einem Polarkreis bis zum Pol reichend, in denen die Sonne nicht an allen Tagen des Jahres auf- und untergeht. Verbindet man die Orte gleicher mittlerer Jahrestemperatur durch Linien, die Jahresisothermen, so würden diese mit den Parallelkreisen zusammenfallen, wenn die geographische Breite allein für den Wert des Jahresmittels in Betracht käme. Die Karte der Jahresisothermen Figur 9 zeigt aber erhebliche Abweichungen hiervon, und es sind in der Tat noch andere Umstände für die Mitteltemperatur maßgebend. Davon sei zuerst die Höhenlage genannt. Je höher ein Ort liegt und je weiter er demnach von den warmen tieferen Erdschichten entfernt ist,

um so weniger Wärme kann er von diesen empfangen. Für die Alpen hat man z. B. gefunden, daß auf 100 m Höhenzunahme die Jahrestemperatur an der Nordseite um 0,51, an der Südseite um 0,59° abnimmt (J. Maurer Eigene Berechnungen und solche von J. Hann Meteorol. Zeitschr. 25 244 1908). Sehr wirksam in der Beeinflussung der Temperaturmittel ist ferner die Verteilung von Land und Wasser. Die größere Beweglichkeit des Wassers sowie seine hohe Aufnahmefähigkeit für Wärme weisen ihm eine ausgleichende Tätigkeit zu, so daß man in der Tat die Meeresoberfläche in niederen Breiten kühler, in höheren förmige Bewegung des Wassers, die um so tiefere Schichten erfaßt, je stetiger und stärker die Luft darüber hinweht. Da nun auf der Südseite des Aequators eine entsprechende Bewegung durch den Südostpassat erzeugt wird und das Wasser also von beiden Seiten schräg aus Osten gegen den Aequator hin getrieben wird, bildet sich dort eine westwärts ziehende Strömung, durch welche die Wassermassen langsam unter den Strahlen der Tropensonne gegen die amerikanische Ostküste geführt werden. Durch diese abgelenkt, biegt die Strömung nach beiden Seiten um, der nördlich abgelenkte Teil gelangt in den Golf von Mexiko

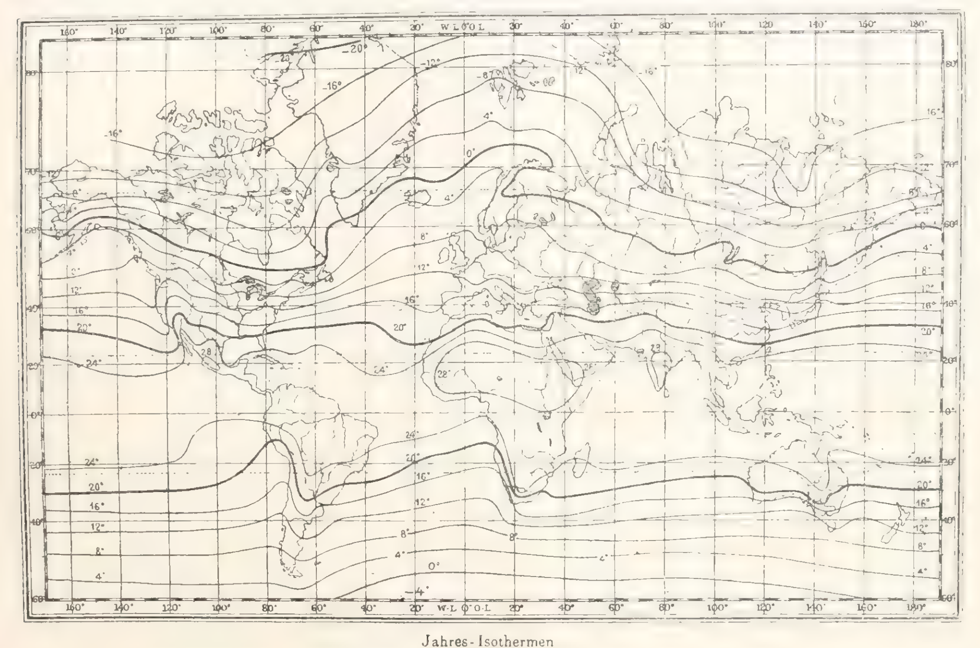


Fig. 9. Jahresisothermen. Aus Hann, Lehrbuch der Meteorologie. 2. Auflage. Leipzig 1906. Zwischen S. 110 und 111.

wärmer findet, als das Festland. Hierauf beruht es, daß die südliche Erdhälfte vermöge ihrer gegen die nördliche erheblich größeren Wasserfläche entsprechende Temperaturunterschiede aufweist: die niederen südlichen Breiten sind kühler als die gleichen nördlichen, umgekehrt aber sind von den höheren Breiten die südlichen wärmer. Mehr noch als die bloße Gestalt der Meere sind die regelmäßigen Meeresströme von Einfluß auf die Wärmeverteilung. Als ein klassisches Beispiel solcher Strömung kann der Golfstrom gelten, der auf den Nordostpassat und seine im nordatlantischen Ozean geübte Wirkung zurückgeführt wird. Indem nämlich die Passatwinde stetig über die See hinströmen, erzeugen sie durch Reibung an der Wasserfläche eine gleichund von dort durch die Floridastraße in den Ozean. Die nordostwärts gerichtete Geschwindigkeit, mit der er die schmale Straße verläßt, sowie die südwestlichen Winde, welche dort vorherrschen, treiben das warme Wasser so rasch gegen die europäische Küste, daß es dort erheblich höhere Lufttemperatur erzeugt, als der geographischen Breite entspricht. Namentlich an der norwegischen Küste sehen wir die Isothermen infolge des Golfstromes recht deutlich gegen Norden ausgebogen und finden dort einen gegen das Binnenland stark erwärmten Küstensaum. Den Rückweg nimmt das vom Golfstrom nach Norden geführte Wasser teils als eine westlich von Spanien und Nordafrika nach Süd verlaufende Strömung, teils von Spitzbergen aus an der

Ostküste von Grönland entlang südwärts fließend, und bei diesen Bewegungen als kalte Strömung, die nach wärmeren Gegenden gerichtet ist. Ganz ähnliche warme und kalte Meeresströme findet man an anderen Stellen der Erde, wo Wind und Sonne die gleichen Vorbedingungen bilden. Der Einfluß des Golfstromes auf die Temperatur der europäischen Küstenländer ist so groß, daß kleine Aenderungen seines Verlaufes sehr deutliche Wärmewirkungen nach sich ziehen. Daher hat man die Luftdruckverteilung und die aus ihr hervorgehenden Winde zum Ausgangspunkt von Untersuchungen gemacht, welche die Schwankungen in der Bahn des Golfstromes und

Nächst der Mitteltemperatur ist für das Klima eines Ortes bedeutsam die Größe der jährlichen und täglichen Schwankungen. Man bezeichnet sie auch als Amplituden und findet sie in erster Linie gleichfalls abhängig von der geographischen Breite. Am Aequator beträgt die Mittagshöhe der Sonne niemals unter 66½°, und alle Tage und Nächte sind dort gleich lang; daher können auch keine so großen Unterschiede zustande kommen, wie sie in der Temperatur höherer Breiten auftreten, veranlaßt durch die im Jahreslauf stark wechselnde Sonnenhöhe und durch den gleichfalls wechselnden Unterschied der Tages- und Nachtdauer. Je mehr man sich vom

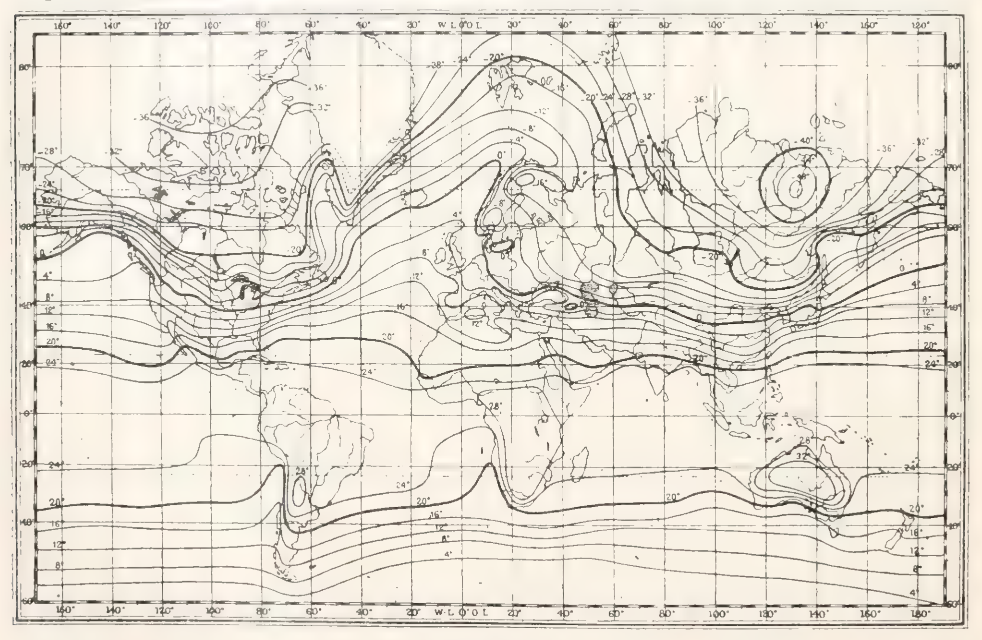


Fig. 10. Januarisothermen. Aus Hann, Lehrbuch der Meteorologie. 2. Auflage. Leipzig 1906. Zwischen S. 100 und 111.

die nachfolgende Einwirkung auf die Lufttemperatur betrafen. Da diese Temperaturwirkungen teilweise recht langsam fortschreiten, konnte man z. B. die Regel aus der Erfahrung bestätigen, daß in Mitteleuropa die Temperatur der Monate Februar und März von Jahr zu Jahr in gleichem Sinne schwankt, wie in den vorausgegangenen Monaten September bis Dezember die Luftdruckdifferenz der Orte Thorshavn (Faröer) und Stykkisholm (Island); und eine andere Erfahrungstatsache ist, daß der Temperaturcharakter, welcher zu Beginn des Winters in Christiansund (Norwegen) herrscht, beim Schluß des Winters und Beginn des Frühlings in Mitteleuropa zum Ausdruck zu kommen pflegt (W. Meinardus Meteor. Zeitschr. 15 85 1898).

Aequator entfernt und dem Pol nähert, um so stärker treten die längeren Tage des Sommers und die kürzeren Tage des Winters hervor und erzeugen sowohl wärmeren Sommer und kälteren Winter, wie auch stärkere Tageswärme und Nachtkühle. Wie groß die Jahresschwankung sein und welche Wirkung die verschiedene Tageslänge haben kann, ersieht man aus folgender, von Chr. Wiener (Oesterreich. Zeitschr. f. Meteor. 14 113 1879) herrührenden Berechnung. Für den längsten Tag der nördlichen Erdhälfte, den 21. Juni, beträgt die dem Boden zugeführte Sonnenstrahlung:

am Nordpol.	1203
in 62° nördlicher Breite .	1092
in 43½° nördlicher Breite	1109

am Aequator 881
in 66½° südlicher Breite 0

Als Strahlungsmenge 1000 ist dabei diejenige angenommen, welche ein am Aequator liegender Ort am 20. März empfängt, die größte also, die am Aequator überhaupt einen Ort treffen kann. Demnach empfängt der Nordpol an jenem Tage um über 20% mehr Wärme als der Aequator an seinem heißesten Tag, und 56 Sommertage lang erhält der Nordpol mehr Wärme als gleichzeitig irgendein anderer Punkt der Erde. Das entsprechende Gegenbild liefert natürlich der Winter, und die große Wärmemenge, die der Sommer den Polargegenden zuführt, wird darum nur teilweise in der Temperaturerhöhung wirksam, und im übrigen zum Schmelzen der großen Eismassen verbraucht, die der Winter erzeugte.

Von starkem örtlichem Einfluß auf die Temperaturschwankung ist ferner die Verteilung von Land und Wasser. Das Wasser hat eine große spezifische Wärme, d. h. um die Temperatur einer Wassermenge zu erhöhen, muß ihr etwa fünfmal so viel Wärme zugeführt werden als der gleichen Gewichtsmenge, und etwa doppelt so viel als der gleichen Raummenge trockenen Bodens. Daher wird durch die Vorgänge der Strahlung und Leitung, von denen die Temperaturänderungen des Bodens abhängen, um so geringere Wirkung erzielt und die Temperatur um so weniger beeinflußt, je mehr Wasser der Boden enthält. Außerdem wird auch von der zugeführten Wärme im Wasser ein Teil zur Verdampfung verbraucht und für die Temperaturerhöhung wirkungslos, während umgekehrt in wasserreicher Gegend die in Dampfform vorhandene Luftfeuchtigkeit bei der Abkühlung teilweise zu Wasser kondensiert wird und zugleich die frei werdende Wärme der weiteren Abkühlung entgegenwirkt. Endlich kommt noch in Betracht, daß die Strahlung der Sonne dort, wo sie auf festen Boden fällt, nur die oberste Schicht erwärmt, während sie in das Wasser tiefer eindringt und die herbeigeführte Wärme auf eine dickere Schicht verteilt, also eine geringere Temperaturerhöhung auch aus diesem Grunde erwirkt. Aehnlich kommt bei der Abkühlung des Wassers die ausgestrahlte Wärme auch von tieferen Schichten her, und dadurch wird eine entsprechend geringere Abkühlung erzeugt als bei festem Boden. Aus allen diesen Gründen finden wir im Seeklima geringere, im Binnenklima größere Jahres- und Tagesschwankungen der Temperatur. Dies zeigt sich recht deutlich in den Januar- und Juli-Isothermen (Fig. 10 und 11). Der Januar ist für die nördliche Erdhälfte der kälteste, für die südliche der wärmste Monat, und der Juli bedeutet umgekehrt im Norden Hitze, im Süden Kälte.

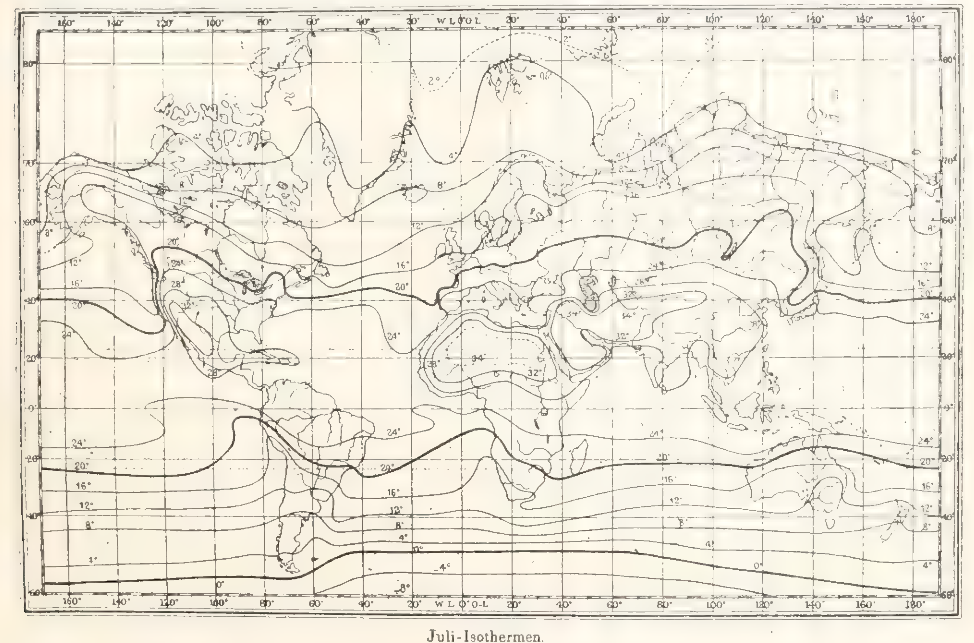


Fig. 11. Juliisothermen. Aus Hann, Lehrbuch der Meteorologie. 2. Auflage. Leipzig 1906. S. 110 f.

Beide Karten lassen erkennen, wie im Winter die Meere wärmer sind als die Länder in der gleichen geographischen Breite, und im Sommer kühler. Die Isothermen biegen im Januar auf den Meeren nach Norden, im Binnenlande nach Süden aus, im Juli umgekehrt. Namentlich die nördliche Erdhälfte zeigt dies deutlicher als die südliche, deren Länderfläche so viel kleiner ist. Uebrigens bezieht sich dieser Unterschied wesentlich auf das Oberflächenwasser, nach der Tiefe hin hat man die Temperaturschwankungen im Wasser größer als im festen Boden gefunden.

In früherer Zeit pflegte man auch dem W a l d eine ähnlich ausgleichende Wirkung auf die Temperaturschwankung zuzuschreiben wie dem Wasser. Es hat sich aber gezeigt, daß dem Walde solche Eigenschaft nur in geringem Grade zukommt, und daß bei älteren Beobachtungen durch Strahlungseinflüsse die Angaben der Thermometer einseitig verändert wurden. Seit man die Bestimmung der Lufttemperatur gegen Strahlungsfehler zu sichern vermag, hat sich die Annahme eines besonderen Waldklimas als nicht begründet ergeben.

Die örtliche Temperaturschwankung hängt ferner von der Bodenbeschaffenheit ab, und zwar sowohl von F a r b e und sonstiger Oberflächenbeschaffenheit, wie von der G e s t a l t d e s B o d e n s. Rauhe und dunkelfarbige Flächen werden durch darauffallende Strahlung stärker erwärmt, als glatte und helle, und kühlen sich bei eigener Ausstrahlung gegen kältere Umgebung auch stärker ab. Darum wird durch dunkle Farbe oder rauhe Oberfläche des Bodens die Temperaturschwankung vermehrt, durch die entgegengesetzten Eigenschaften verringert. Und zwischen Berg- und Tallage entsteht eine Verschiedenheit zunächst, weil der Gipfel dem Bodeneinfluß weniger ausgesetzt ist als die auch an den Seiten vom Boden umgebende Talstation, so daß also oben die Temperaturschwankung des Bodens sich der Luft weniger mitteilt. Dann aber kommt hinzu, daß bei nächtlicher Abkühlung die schwere kalte Luft nach unten fließt und sich im Tal ansammelt, dagegen die wärmere Luft der Tagesstunden vom Gipfel durch Wind fortgeführt, im Tal aber weniger bewegt wird. Das Gipfelklima gleicht also dem Seeklima und hat geringere Temperaturschwankungen als das Talklima. Die Erfahrung zeigt ja oft genug, wie Frostschäden in klaren Frühjahrsnächten vorzugsweise tiefe Lagen treffen, während benachbarte Gipfel ungeschädigt bleiben.

Nachdem so eine Reihe örtlicher Einflüsse geschildert wurde, seien noch einige zeitliche Aenderungen erwähnt, von denen die Temperaturschwankung abhängt. Zunächst kommt hier die J a h r e s z e i t in Betracht; im Sommer empfängt der Boden während des Tages von der höher steigenden und länger scheinenden Sonne mehr Wärme als im Winter, strahlt aber wegen seines größeren Wärmegehalts in der Nacht auch stärker aus. Darum ist in der warmen Jahreszeit die Tagesschwankung größer als in der kalten, wie z. B. bei Figur 8 erkennbar ist. Eine andere zeitliche Beeinflussung der Temperaturschwankung rührt von der B e w ö l k u n g her. Welch wichtige Rolle im Wärmehaushalt des Bodens und der Luft die Strahlung ausübt, wurde schon mehrfach erörtert. Bei klarem Himmel kann sowohl die Einstrahlung von der Sonne aus wie auch die Ausstrahlung des Bodens ungehindert die Atmosphäre durchsetzen, während eine Wolkenschicht in beiden Richtungen die Strahlung hindert. Darum ist die klare Witterung von starken Schwankungen der Temperatur begleitet, sowohl die Tageswärme wie die nächtliche Kühle werden vom hellen Himmel begünstigt, und andererseits erzeugt die strahlenhemmende Wolkendecke verringerte Tageswärme und auch minder kalte Nächte.

Die bei klarem Wetter auftretende nächtliche Strahlungskälte kann namentlich im Frühjahr Schaden stiften, wenn die Lebenstätigkeit der Pflanzen beginnt und die Temperatur noch tief genug liegt, um bei einiger Abkühlung den Gefrierpunkt zu erreichen. Man sucht derartige Schädigung namentlich bei wertvollen Anpflanzungen, wie Obst- und Weinkulturen, durch Erzeugung einer künstlichen Wolkendecke mittels stark rauchender Feuer zu bekämpfen.

Die periodischen, nämlich täglichen und jährlichen Schwankungen der Temperatur werden von den unperiodischen unterbrochen, nämlich solchen, die nicht durch die Bewegungen der Erde entstehen, sondern aus atmosphärischen Vorgängen, deren ursächliches Verstehen uns bisher noch nicht gelungen ist. Figur 12 zeigt das Fortschreiten der Temperatur während eines Jahres von Tag zu Tag, berechnet aus 100 jährigen Beobachtungen. Man erkennt an diesen Kurven die große Häufigkeit der unperiodischen Schwankungen, wie sie in der warmen Jahreszeit als Kälterückfälle und in der kalten als Wärmerückfälle auftreten. Und es erscheint recht begreiflich, daß der Volksglaube solche Rückfälle an bestimmte Daten heftet (die „gestrengen Herren“ im Mai), denn sie sind in jeder Jahreszeit häufig genug, so daß meistens auf die bestimmten Tage wenigstens ungefähr eine unperiodische Schwankung fallen kann. Die Größe dieser unperiodischen Aenderungen ist wie die der periodischen von den schon erwähnten klimatischen Einflüssen abhängig, die bei-

spielsweise das Binnen- vom Seeklima unterscheiden. Als Maß dient dabei nach Hanns Vorschlag die Veränderlichkeit der Temperatur von Tag zu Tag, nämlich der durchschnittliche Unterschied benachbarter Tagesmittel ohne Rücksicht auf das Vorzeichen. Dieser beträgt z. B. im Mittel der Jahre 1891 bis 1899 nach L. Großmann (Archiv d. Seewarte **23** Nr. 5 1900) für Bremen 2,32°, dagegen für die im sibirischen Binnenlande gelegene Station Barnaul im Mittel der Jahre 1853—1862 nach Wahlén (Rept. f. Meteorol. III. Suppl.-Bd. 1886) 4,23°. V. Kremser (Abhandl. d. Kgl. Preuß. Meteorol. Inst. **1** Nr. 1 1888) verglich für eine Anzahl deutscher Orte die namentlich seiner Leitfähigkeit für Wärme, abhängig. Darum ist das Verhalten des Bodens nicht bloß starken örtlichen Verschiedenheiten unterworfen, sondern am gleichen Orte ändern sich mit dem Wassergehalt der Oberfläche die Temperaturverhältnisse beträchtlich, weil feuchter Boden ein sehr viel besserer Wärmeleiter ist als trockener. Als allgemein gültig läßt sich immerhin sagen, daß die Mitteltemperatur des Jahres nach unten hin und mit Annäherung an die wärmeren Schichten der Tiefe wächst, und daß andererseits die periodischen und unperiodischen Schwankungen nach unten hin sowohl kleiner werden als auch gegen die Oberfläche verspätet eintreten,



Fig. 12. Jährlicher Gang der Tagestemperatur nach 100 jährigem Durchschnitt. Aus Hann, Lehrbuch der Meteorologie. 2. Auflage. Leipzig 1906. S. 84.

Veränderlichkeit der Temperatur mit der Zahl der Sterbefälle und fand bei beiden ganz ähnliche örtliche wie jahreszeitliche Verteilung, jedoch mit der Besonderheit, daß die Schwankungen der Sterblichkeit um zwei Monate gegen die der Veränderlichkeit verspätet waren. Es liegt nahe genug, diese Zeit als die mittlere Dauer anzusehen, die zwischen Erkrankung (bei Temperaturänderung) und Tod verläuft.

Die Temperatur des Bodens ist vielfach untersucht worden und zeigt sich in hohem Grade von der Art des Bodens, weil ja diese Schwankungen ihren Ursprung in den Strahlungswirkungen haben, die an der Oberfläche stattfinden, und weil auf dem Wege der Leitung von oben zu den tieferen Schichten sowohl die Größe der Wärmebewegung allmählich aufgezehrt wird, wie auch wegen Langsamkeit der Leitung Zeit verbraucht wird. Daß die tägliche Temperaturschwankung bereits in mäßig tiefen Kellern unmerkbar ist, wird durch vielfache Erfahrung bestätigt. Die Jahresschwankung dringt vermöge ihres höheren Betrages und langsameren Verlaufes tiefer ein, doch

kann man auch sie in erreichbarer Tiefe verschwinden sehen. So wurden im obersten Tunnelstück der Jungfraubahn, 400 m unter der südöstlichen Felswand des Mönchs und in 3270 m Seehöhe bei täglichen Messungen vom Juli bis zum 11. November 1910 Temperaturen gefunden, die nur um $^{2}/_{10}{}^{0}$ schwankten (J. Maurer, Meteorol. Zeitschr. 28 77 1911). Und im Potsdamer geodätischen Observatorium befindet sich 25 m unter der Bodenoberfläche ein Thermometer, das dauernd 11,7° zeigt (O. Hecker, Das Wetter, Novemberheft 1907). Endlich sei als Beispiel der Verspätung erwähnt, daß im Königsberger Botanischen Garten die durchschnittliche Jahrestemperatur von 7,68° an der Oberfläche auf 8,44° in 7,5 m Tiefe steigt, zugleich aber in dieser Tiefe die wärmste Jahreszeit von Juli bis Dezember, die kälteste von Januar bis Juni verspätet ist.

Von wesentlichem Einfluß auf die Bodentemperatur ist ferner eine zusammenhängende Schneedecke. Diese leitet die Wärme sehr schlecht, weil im Schnee eine große Luftmenge eingeschlossen und durch die Schneekristalle an der Bewegung gehindert ist. Die Luft kann also nicht durch Strömungen die Bodenwärme fortführen, sondern wirkt als Wärmeschutz für den Boden ganz in derselben Art, wie etwa ein Pelz als Wärmeschutz für den Körper wirkt: die Haare des Pelzes hindern die Luftbewegung und lassen die geringe Leitfähigkeit der Luft zur vollen Wirkung im Zusammenhalten der Körperwärme gelangen. Der von der Schneedecke gegen Wärmeverlust geschützte Boden hat demnach höhere Temperatur und sichert die etwa hineingelegte Saat besser gegen Kälte, als es ohne Schnee sein würde. Andererseits ist die Luft über der Schneeschicht um so kälter, je mehr Wärme im Boden bleibt.

Die Temperatu verhältnisse der höheren Luftschichten wurden namentlich in neuerer Zeit vielfach untersucht und finden um so mehr Bearbeitung, je notwendiger sich für das Verständnis der Witterungsvorgänge die Beachtung der oben geschehenden Veränderungen erweist. Die schon geschilderte Wechselwirkung der Temperaturen des Boden und der untersten Luftschicht hat stete vertikale Bewegungen der Luft zur Folge. Hierbei gelangt die Luft unter veränderten Druck und erleidet entsprechende Temperaturänderungen, durch Druckzunahme entsteht dynamische Erwärmung (wie im pneumatischen Feuerzeug), durch Druckabnahme dynamische Abkühlung. Demnach wird im absteigenden Strom die Luft dynamisch erwärmt, im aufsteigenden Strom abgekühlt, und zwar beträgt diese Aenderung ziemlich genau 1° für je 100 m Höhenänderung. Ebensoviel müßte also das Temperaturgefälle, d. h. die Abkühlung auf je 100 m Höhenzunahme, in einer ohne sonstige Beeinflussung auf- oder abwärts bewegten Luft betragen. In der Atmosphäre ist es trotz der vielen auf- und absteigenden Ströme merklich kleiner, wie die Tabelle auf S. 591 erkennen läßt, und zwar teils vermöge der Kondensation des im Emporsteigen verdichteten Wasserdampfes und der hierbei frei werdenden latenten Wärme, teils infolge der einseitig die Abkühlung begünstigenden Bodenwirkung. Es erzeugt nämlich die Erwärmung des Bodens mit nachfolgender Erwärmung der unteren Luftschicht eine aufsteigende Bewegung, sobald das Temperaturgefälle stark genug geworden ist (mindestens 3,4° auf 100 m), um die Dichte der unteren, erwärmten Luft trotz des unten größeren Luftdrucks kleiner zu machen als die Dichte der nächsthöheren Schicht. Dann ist die unterste Luft leichter und steigt empor, während zu ihrem Ersatz andere und kältere Luft von oben herabkommt. Wenn dagegen der Boden und die ihm benachbarte Luft kälter werden, folgt daraus zunächst keine Bewegung, weil die kältere und schwerere Luft sich ja schon unten befindet und nicht mehr sinken kann; nur durch Wechselwirkung mit benachbarten wärmeren Gegenden kann ein absteigender Strom sich bilden. Im Durchschnitt kommt also als Wirkung der Bodentemperatur eine Abkühlung der unteren Luft häufiger als eine Erwärmung zustande, und man hat darum geradezu von einer abkühlenden Wirkung des Bodens gesprochen. Auf diese Art wird es verständlich, daß das Temperaturgefälle in der Atmosphäre unten nur 0,3 bis 0,4° auf 100 m beträgt und auch in der Höhe bis etwa 8000 m nicht über 0,8° steigt, während es unter alleiniger Einwirkung der auf- und absteigenden Ströme 1° betragen müßte. In der Höhe von etwa 12 000 km verschwindet die Wirkung des Bodens und mit ihr die auf- und absteigende Bewegung, es beginnt dort die schon erwähnte Stratosphäre, auch isotherme Schicht genannt, weil dort das Temperaturgefälle nahezu Null wird.

Von den periodischen Temperaturänderungen reicht die tägliche Schwankung nicht über die untersten Höhenkilometer hinaus, natürlich verschieden hoch, je nach der im Einzelfall auftretenden Größe der Schwankung. Aus den Beobachtungen von 4 am 8. Juni 1898 aufgestiegenen Luftballons konnte man berechnen, daß in 3000 m Höhe von der Tagesschwankung nur etwa $^{1}/_{20}$, darüber verschwindend wenig erkennbar war. Die Jahresschwankung ist noch in der isothermen Schicht deutlich, und zwar wechselt dort mit der Jahreszeit sowohl die

Mittelwerte der Temperatur in der freien Atmosphäre.

Höhe, Kilometer	Jan.	Febr.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.	Jahr	Jahresschwankung
0	— *1,5*	— 0,9	1,8	5,4	9,5	13,3	16,3	17,4	15,7	11,3	5,6	0,8	7,9	18,9
1	— *2,7*	— 2,6	— 1,2	1,2	4,7	**8,7**	**12,2**	13,6	11,9	7,8	2,9	— 0,9	4,6	16,3
2	— 5,4	— *5,7*	— 5,3	— 3,9	— 0,9	3,2	6,8	**8,2**	6,5	2,7	— 1,3	— 4,2	0,1	13,9
3	— 9,8	— *10,5*	— *10,5*	— 9,4	— 6,4	— 2,1	1,7	**3,1**	1,4	— 2,3	— 6,0	— 8,5	— 5,0	13,6
4	— 15,7	— 16,5	— *16,6*	— 15,3	— 12,0	— 7,6	— 3,8	— **2,5**	— 4,3	— 7,8	— 11,6	— 14,2	— 10,7	14,1
5	— 21,9	— 22,7	— *23,1*	— 22,1	— 19,0	— 14,2	— 9,8	— **8,1**	— 9,8	— 13,8	— 17,8	— 20,5	— 16,9	15,0
6	— 29,0	— 30,2	— *30,5*	— 29,1	— 25,4	— 20,5	— 16,4	— **15,0**	— 16,7	— 20,4	— 24,2	— 27,1	— 23,7	15,5
7	— 36,0	— 37,5	— *38,0*	— 36,5	— 32,4	— 27,2	— 23,0	— **21,9**	— 23,9	— 27,6	— 31,2	— 33,9	— 30,8	16,1
8	— 43,3	— 44,8	— *45,3*	— 43,7	— 39,8	— 34,6	— 30,6	— **29,2**	— 31,0	— 34,5	— 38,2	— 41,1	— 38,0	16,1
9	— 49,2	— 50,4	— *50,6*	— 49,2	— 45,8	— 41,5	— 37,9	— **36,8**	— 38,3	— 41,4	— 44,7	— 47,3	— 44,4	13,8
10	— 54,4	— *55,1*	— 54,4	— 52,4	— 49,7	— 46,8	— 44,7	— **43,9**	— 44,8	— 46,9	— 49,7	— 52,5	— 49,6	11,2
11	— *57,6*	— 57,3	— 55,7	— 53,8	— 52,0	— 50,3	— 49,0	— **48,3**	— 48,9	— 50,9	— 53,8	— 56,4	— 52,8	9,3
12	— *58,9*	— 57,9	— 56,0	— 54,0	— 52,4	— 51,1	— **50,3**	— **50,3**	— 51,3	— 53,5	— 56,2	— 5[illegible],3	— 54,2	8,6
13	— *58,3*	— 58,0	— 56,9	— 55,1	— 53,0	— 51,1	— **50,2**	— 50,6	— 52,1	— 54,2	— 56,2	— 57,7	— 54,5	8,1
14	— *58,0*	— 57,6	— 56,8	— 55,3	— 53,2	— 51,0	— **49,7**	— 50,1	— 52,1	— 54,7	— 56,8	— 57,9	— 54,4	8,3
15	— 57,7	— 57,2	— 56,6	— 55,3	— 53,1	— 50,6	— **49,2**	— 49,7	— 52,1	— 55,0	— 57,1	— 57,9	— *57,9*	8,7
16	— 57,9	— 57,1	— 56,1	— 54,8	— 52,8	— 50,6	— **49,1**	— 49,3	— 51,4	— 54,5	— 57,0	— 58,1	— *58,1*	9,0

Temperatur als auch die Höhenlage, in welcher die Isothermie beginnt. Die nachfolgenden Mittelwerte sind von A. Wagner (Beitr. z. Physik d. freien Atmosph. **3** H. 2 u. 3. Auszug in Meteorol. Zeitschr. **27** 97 1910) aus 380 Aufstiegen von Registrierballons berechnet, die sämtlich mindestens 8000 m Höhe erreichten und in den 5 Jahren von Juli 1902 bis Juni 1907 an verschiedenen Orten stattfanden. Selbstverständlich weichen die Temperaturverhältnisse der einzelnen Tage vielfach von diesen Mittelwerten ab. Namentlich erleidet das Temperaturgefälle oftmals starke Veränderungen durch Auftreten von Isothermien (Gefälle Null) oder von Inversionen (wärmere Schicht über kälterer).

Zur Messung der Lufttemperatur dient das Thermometer, von dem ein besonderer Artikel dieses Werkes handelt (vgl. den Artikel „Thermometrie“). Hier soll daher nur erwähnt werden, daß behufs richtiger Ermittelung der Lufttemperatur das Instrument gegen Strahlungseinflüsse geschützt sein muß, und zwar sowohl gegen erwärmende Strahlung anderer Körper wie auch gegen die abkühlende eigene Ausstrahlung. Man hat dies zu erreichen gesucht, indem man die Thermometer in Hütten oder Gehäuse einschloß, die dem Wind freien Durchzug gewähren und zugleich die Strahlung hindern sollten. Indessen sind diese Schutzhüllen selbst der Strahlung ausgesetzt und beeinflussen durch ihre eigene Temperatur leicht das Thermometer, so daß dies trotzdem zu hohe oder zu niedere Temperaturen anzeigt, wenn das Gehäuse der Sonne oder der eigenen nächtlichen Ausstrahlung ausgesetzt ist. Als wirksam dagegen hat sich ein anderes Verfahren bewährt; es besteht darin, daß das Thermometer mit stets und rasch erneuerter Luft in Berührung ist. Dies wurde ursprünglich bei den „Schleuderthermometern“ dadurch erreicht, daß man das Instrument mittels einer kurzen Schnur oder ähnlichen Vorrichtung in rasche, wirbelnde Bewegung versetzte und sein Gefäß auf diese Art mit einer beständig wechselnden Lufthülle in Berührung brachte. Beginnt das Thermometer infolge von Strahlung über die Lufttemperatur zu steigen oder unter sie zu sinken, so wird diese Abweichung sogleich im Entstehen unterdrückt, weil die Lufthülle stets auf der Temperatur der Umgebung gehalten wird und durch Leitung jedes beginnende Zuviel oder Zuwenig an Wärme gleich zum Verschwinden bringt. Etwas bequemer ist das neuerdings mehr in Aufnahme gekommene Aspirationsthermometer (R. Aßmann Berliner Sitzber. 1887 [2] 938), welches auf der gleichen Erwägung beruht. Das Thermometergefäß ist mit einer unten offenen Röhre

umgeben, durch die von oben her mittels Uhrwerks und Zentrifugalgebläse Luft hindurchgesaugt wird. Indem die Luft hier in Bewegung ist und an dem ruhenden Thermometergefäß vorbeistreicht, nimmt sie diesem gleichfalls jedes Zuviel oder Zuwenig sogleich im Entstehen und veranlaßt denjenigen Thermometerstand, welcher der Temperatur der hindurchgesogenen Luft entspricht. Man hat also dafür zu sorgen, daß diese Luft nicht etwa irreführenden Wärmeeinflüssen ausgesetzt ist. Zur größeren Sicherheit gegen äußere Strahlung ist das Rohr mit blank polierter Oberfläche versehen.

4. Bewölkung. In der Reihe der meteorologischen Elemente folgt nun die Feuchtigkeit, der samt Staubwirkung und Nebelbildung ein besonderer Artikel dieses Werkes gewidmet ist, und die Bewölkung. Von der Feuchtigkeit sei hier kurz erwähnt, daß die Menge gasförmigen Wasserdampfes, die in einem Raume vorhanden sein kann, sich mit der Temperatur ändert. Je wärmer eine Luftmasse ist, um so mehr Dampf kann ihr beigemengt sein; der höheren Temperatur entspricht eine größere Sättigungsmenge an Dampf. Daher wird durch Abkühlen die Luft der Sättigung näher gebracht, und wenn die Temperatur bis zum Sättigungszustande, d. h. bis zum Taupunkt gesunken ist, so hat die weitere Wärmeentziehung die Wirkung, Kondensation einzuleiten und die Bildung feiner Tröpfchen oder Eisnadeln zu erzeugen. Diese sind es, die wir bei massenhaftem Auftreten als Wolken bezeichnen. Die zur Wolkenbildung gehörige Temperaturerniedrigung geschieht fast ausschließlich durch Emporsteigen der Luft als dynamische Abkühlung. Man hat zwar zuweilen auch die Mischung verschieden warmer und feuchter Luftmengen als Ursache der Wolkenbildung darzustellen versucht, indessen kann auf diese Art nur sehr wenig Kondensation zustandekommen. Werden zwei gleiche Luftmengen von 0 und 20°, die beide bei 700 mm Quecksilberdruck mit Wasserdampf gesättigt sind, miteinander gemischt, so ist das Gemisch 11° warm und ergibt höchstens 0,75 g kondensiertes Wasser für jedes Kilogramm der Mischung (oder, was fast genau dasselbe bedeutet, für je ein Kubikmeter). Die Luft von 20° braucht nur 310 m hoch emporzusteigen, um die gleiche Wassermenge zu kondensieren. Bei dieser durch W. v. Bezold (Berl. Sitzber. 1890 355) angestellten Rechnung ist aber bereits ein in der Wirklichkeit kaum vorkommender Temperaturunterschied der zu mischenden Luftmengen (20°!) und außerdem völlige Sättigung beider angenommen, und trotzdem ist die Wassermenge, welche sich bei solcher Mischung bilden kann, nicht größer als in sehr dünnem Gewölk. Der Wassergehalt von Wolken ist mehrfach bestimmt, z. B. im Juli 1908 auf dem Hohen Sonnblick (3106 m) durch A. Wagner (Meteorol. Zeitschr. **26** 371 1909), der eine luftleer gemachte Flasche in der Wolke öffnete und danach die darinnen befindliche Wassermenge maß. Es ergab sich in 22 Fällen durchschnittlich ein Wassergehalt von 2 g im Kubikmeter, der größte Wert betrug 4,84, der kleinste 0,12 g. Auf Grund ähnlicher Messungen fand V. Conrad (Meteorol. Zeitschr. **16** 566 1901) in dichteren Wolken, die 20 m weit zu sehen gestatten, 4,5 g Wasser im Kubikmeter, bei minder dichten Wolken mit 80 m Sichtweite 0,4 g.

Demnach sind es ganz vorwiegend aufsteigende Luftströme, denen man die Wolkenbildung zuschreiben muß, und natürlich ist umgekehrt der absteigende Strom mit seiner dynamischen Erwärmung die Ursache des Verdampfens und Verschwindens von Wolken. Recht schön kann man dies beobachten, wenn der Wind Luftmassen über ein Gebirge herüberführt. Auf der Windseite wird die aufsteigende Luft abgekühlt, und wenn sie Feuchtigkeit genug enthält, um bis zur Kammhöhe ihre Sättigung zu erreichen, so bilden sich Wolken, die aber auf der anderen Gebirgsseite im absteigenden Strom wieder verdampfen und unsichtbar werden. So entsteht auch die an Berggipfeln so häufig auftretende Wolkenkappe, die trotz des oftmals kräftigen Windes ihre Stelle behält, nicht weggeweht wird. Denn diese scheinbar ruhende Wolke ist in Wirklichkeit gar kein bestimmter Körper, sondern ist nur der Raum, in welchem die vom Winde vorübergewehte Feuchtigkeit uns sichtbar ist. Vor- und nachher besteht sie aus nicht sichtbarem, luftförmigem Dampf, und nur im obersten und kältesten Teile ihrer Bahn, nämlich beim Ueberschreiten des Gipfels, ist sie teilweise zu Tropfen kondensiert und wird dem Auge bemerkbar. Das scheinbare Schweben der Wolken ist ähnlich zu deuten. In Wirklichkeit besteht ja eine jede Wolke aus Wassertropfen oder Eiskristallen, die beide schwerer als Luft sind und also in ihr nicht schweben können. Sie fallen auch in der Tat herunter, langsam freilich wegen des großen Luftwiderstandes, den so kleine Körper zu überwinden haben, und darum wird nur derjenige Teil von ihnen tatsächlich sinken, welcher rascher fällt, als der die Wolke erzeugende Luftstrom aufsteigt. Diese größten und deshalb rascher fallenden Tröpfchen gelangen im Fallen an die untere Wolkengrenze und finden dort eine Luftschicht, die noch nicht bis zum Taupunkt abgekühlt, d. h. nicht mit Dampf gesättigt ist und Feuchtigkeit aufzunehmen vermag. Wenn hier die sinkenden Tropfen verdampfen,

ist damit die scheinbare untere Wolkengrenze und das „Schweben" der Wolke erwirkt. Wenn aber ein Teil der Tropfen so groß ist, daß er früher den Boden erreicht als verdampft, so haben wir Regen und sehen die Wolke in der bekannten verwaschenen Gestalt, welche eine untere Grenze nicht erkennen läßt.

Die nahe Beziehung des aufsteigenden Luftstroms zur Wolkenbildung tritt recht deutlich in einer Beobachtung hervor, über welche K. Wegener (Nachr. d. Kgl. Ges. d. Wissensch. Göttingen math.-phys. Kl. 1910 6) berichtet. Beim Aufstieg eines mit Registrierapparaten versehenen Drachens am 7. Januar 1909 in Samoa wurde eine Anzahl turmförmiger Haufenwolken bemerkt. In jedem dieser Wolkentürme zeigte sich der Auftrieb des Drachens durch das Aufsteigen der Luft merklich vermehrt, dagegen war 50 m vor oder hinter der Wolke die absteigende Luftbewegung so stark, daß die Drachen rasch fielen.

Die einzelnen Vorgänge, welche sich bei der Wolkenbildung im aufsteigenden Luftstrom abspielen, haben durch H. Hertz (Meteorol. Zeitschr. **1** 424 474 1884) folgende Bezeichnung und Schilderung gefunden. Beim Beginn des Aufsteigens ist die Luft noch nicht mit Feuchtigkeit gesättigt und bewegt sich nach oben ohne Aenderung des Aggregatzustandes mit einem Temperaturgefälle von 1° auf 100 m. Dieser Zustand wird als Trockenstadium bezeichnet. Ist durch die dynamische Abkühlung der Taupunkt erreicht, so beginnt mit Eintritt der Sättigung die Kondensation, und zwar, solange die Temperatur über 0° liegt, mit Entstehung von Wassertropfen. Diese Schicht, welche Regenstadium heißt, wird einerseits durch die aufsteigende Bewegung abgekühlt, erhält aber die bei der Kondensation freiwerdende Wärme, und darum beträgt in ihr das Temperaturgefälle nur etwa einen halben Grad auf 100 m. Ihre obere Grenze liegt dort, wo die Temperatur auf 0° sinkt. Ist der aufsteigende Luftstrom kräftig genug, so führt er über diese Grenze eine Anzahl flüssiger Tropfen mit sich herauf, deren Temperatur nun beginnt unter 0° zu sinken. Solange derartige Tropfen nicht mit Eis in Berührung kommen, können sie flüssig, im sogenannten überschmolzenen Zustande verbleiben. Allmählich werden indessen die überschmolzenen und sehr wenig unter 0° abgekühlten Tropfen durch Berührung mit Schneekristallen, die aus größerer Höhe kommen, oder mit bereits erstarrten Hagelkörnern zum Gefrieren gebracht und nehmen dabei die Temperatur von 0° wieder an, indem sie zugleich die gebundene Wärme abgeben. Diese Höhenschicht, die als Hagelstadium bezeichnet wird, ist also die Ursprungsstelle der rasch erstarrten und darum nicht kristallinischen Hagelkörner und hat durchweg eine Temperatur von sehr nahe 0°. Wenn alle Tropfen zu Hagelkörnern erstarrt sind, beginnt das Schneestadium, in dem bei weiter fortschreitender Abkühlung kleine Schneekristalle als Ergebnis der Kondensation entstehen und durch Aneinanderlegen größere Körper die Schneeflocken bilden. Dieser Zustand reicht soweit hinauf, wie der aufsteigende Luftstrom gelangt. Nicht alle diese Stadien treten regelmäßig auf. Ist die aufsteigende Strömung nur gering, so erreicht sie vielleicht nicht den Taupunkt, und es besteht lediglich das Trockenstadium. Dies kann andererseits auch ganz ausfallen, wenn die Luft nämlich schon am Boden gesättigt ist und demnach das Regenstadium gleich unten beginnt. Wenn der aufsteigende Strom ferner nicht stark genug ist, um flüssige Tropfen über das Regenstadium hinaufzuheben, so fällt das Hagelstadium aus und es folgt dem Regen- unmittelbar das Schneestadium. Bei Temperaturen unter 0° fällt Regen- und Hagelstadium aus, so daß das Schneestadium sich dem Trockenstadium anschließt usw. Dem Beobachter zeigt sich das Regen- und Schneestadium als Wasser- oder Eiswolke, deren Form ihre Entstehungsweise meist erkennen läßt. Der ungestört aufsteigende Luftstrom bildet in seinem oberen Teil eine Haufenwolke (Cumulus), deren untere Grenze glatt erscheint, weil sie die Höhe bezeichnet, in der die aufsteigende Luft ihren Taupunkt erreicht. Nach oben hin ist die Wolkengrenze zugleich die des aufsteigenden Stromes und hat entsprechende runde (Kuppel-) Form. Gewöhnlich ist der obere Teil in der Windrichtung verschoben, weil er durch den stärkeren Oberwind vorausgetrieben wird. Gelangt der aufsteigende Strom in eine von der unteren abweichende horizontale Strömung, so wird sein Oberteil seitlich fortgeführt und bildet an der Grenze eine Wolkenschicht von geringer Höhenausdehnung: Schichtwolke (Stratus). Dasselbe geschieht, wenn der aufsteigende Strom eine Inversion antrifft, eine wärmere Schicht nämlich, in der sein Auftrieb unwirksam wird und er sich nur noch seitlich bewegt. Wolken, die bei Temperaturen unter 0° entstehen und daher aus Eiskristallen gebildet werden (Schneestadium), pflegt man als Federwolken (Cirrus) zu bezeichnen, solche, die bis zum Boden reichen und Regen herabsenden (Regenstadium), heißen Regenwolken (Nimbus). Aus den lateinischen Wolkennamen, die vorstehend in Klammern aufgeführt sind, hat man vermöge internationaler Vereinbarung die Bezeichnung für eine Anzahl typischer Wolkenformen zu-

sammengesetzt; durch Zusatz des Wortes Cirro- werden die höchsten, durch Alto- die Wolken mittlerer Höhe gekennzeichnet. Folgendes sind die internationalen Wolkennamen:

A. Obere Wolken von durchschnittlich 9000 m Höhe:
Cirrus, zart, weiß, faserig;
Cirrostatus, feiner, weißlicher Schleier.

B. Mittelhohe Wolken zwischen 3000 und 7000 m:
Cirrocumulus, zarte Schäfchen;
Altocumulus, derber aussehende Schäfchen;
Altostratus, dichter Schleier, grau oder blau, Höfe um Mond und Sonne erzeugend.

C. Untere Wolken unter 2000 m.
Stratocumulus, dicke Ballen oder Wülste;
Nimbus, dunkle Regenwolke mit unbestimmten Konturen.

D. Wolken aus den untertags aufsteigenden Strömen.

Cumulus, dicke Haufenwolken, unten glatt, oben kuppelförmig, 1400 bis 1800 m; Cumulonimbus, Gewitterwolken, massige Türme und ähnliche Gestalten, oben meistens ausgekämmt („falscher Cirrus"), von 1400 m bis zu 3000 bis 8000 m emporragend.

E. Gehobene Nebel unter 1000 m.

Stratus, wagerecht geschichtet.

In Figur 13 bis 17 sind einige dieser Wolken dargestellt. Von besonderen Wolkenformen sei ferner erwähnt die Wogenwolke (Fig. 15), die als eine Anzahl paralleler Wolkenstreifen fast täglich zu sehen ist, oftmals perspektivisch derartig verschoben, daß die Streifen scheinbar gegen einen fernen Himmelspunkt zusammenlaufen, so wie die Baumreihen einer Allee sich in der Ferne einander zu nähern scheinen. Die von H. v. Helmholtz (Berl. Sitzber. 1889 [2] 761) herrührende und seitdem durch viele Luftschiffer bestätigt gefundene Deutung läßt diese Wolkenform an der Grenze zweier Luftströme entstehen, die übereinander hinfließen und an Dichte, Temperatur und Bewegungsrichtung verschieden sind. Wie der Wind, der über die Meeresfläche weht, Wellen erzeugt, so ruft die leichtere Oberströmung auf der schwereren unteren Luftschicht ebenfalls Wogen hervor, und wenn die Luft dort ausreichende Feuchtigkeit enthält, bildet sich in den aufwärts bewegten Wellenbergen Wolkenmasse, während in den Wellentälern mit ihrer absteigen-



Fig. 13. Cirrus. Aus J. Vincent, Atlas des nuages Bruxelles Hayez 1907 Pl. II Fig. 6.

Fig. 14. Altocumulus. Ebenda Pl. IV Fig. 13.



Fig. 15. Altocumulus, Wogen. Ebenda Pl. V Fig. 19.

Fig. 16. Altostratus. Ebenda Pl. VI Fig. 22.

Fig. 17. Cumulus. Ebenda Pl. VII Fig. 26.

den Bewegung die Tropfen verdampfen. Dem irdischen Beobachter erscheinen dann die Wellenberge als ebensoviele Wolkenstreifen, während dazwischen in den Wellentälern der blaue Himmel sichtbar wird.

Eine viel seltener auftretende Wolkenform, die vielleicht auch auf Luftwogen zurückzuführen ist, wird als Mammatocumulus bezeichnet und besteht aus abwärts gerichteten, buckelförmigen Hervorragungen der unteren Wolkenfläche. Bei örtlich begrenztem, stark aufsteigendem Luftstrom findet sich ferner zuweilen die Pilzform der Wolken, entstehend durch flache seitliche Ausbreitung der aufgestiegenen Luft, entweder bei Aufhören des von unten kommenden Nachschubes oder auch beim Erreichen einer wärmeren Schicht, in der der Auftrieb rasch abnimmt. Solche Wolken treten zuweilen in Begleitung von Hagel auf. Endlich sei noch eine merkwürdige Erscheinung erwähnt, die von Luftschiffern beim Herabblicken auf tiefer liegende Wolken oftmals beobachtet wurde; sie besteht im Auftreten von Vertiefungen der oberen Wolkenfläche über den Stellen des Erdbodens, an denen sich Wasser befindet. Man hat bei solchem Anblick in einzelnen Fällen lange Flußläufe mit ihren Nebenflüssen in der Wolkendecke abgebildet gesehen, und die Häufigkeit dieser auch durch Photographieren bestätigten Beobachtung läßt an der Wirklichkeit der Erscheinung keinen Zweifel mehr zu. Vielleicht beruht auch dies, wie das Sinken der Luftballons über Gewässern (S. 581), auf der gegen die Umgebung tieferen Lage der Wasserfläche, die den Wind nach unten ausbiegen läßt und ein teilweises Verdampfen der Wolken erzeugt.

Die Beobachtung der Wolken hat für die Erkennung der Wetterlage große Bedeutung, weil sie zugleich die Windrichtung und Windstärke in den verschiedenen Höhen sichtbar macht. Dazu ist freilich Kenntnis der Wolkenhöhe nötig, und diese kann durch Schätzung und Messung festgestellt werden. Bei der Schätzung kommt der Umstand in Betracht, daß in der Höhe sowohl die Luft dünner wird als auch die Feuchtigkeit, und daß darum die Wolken um so geringere Dichte haben und um so mehr Licht hindurchlassen, je höher sie sich befinden. Ganz allgemein ist also die hellere Wolke die höhere, und dies erlaubt sowohl die Vergleichung verschiedener Wolkenschichten als auch in Verbindung mit der Wolkenform eine Höhenschätzung. Messend die Höhe festzustellen, hat man trigonometrische oder photogrammetrische Methoden mit gleichzeitiger Beobachtung von zwei Stellen aus angewendet, oder auch bei Sonnenschein die scheinbare Bewegung der Wolke mit der wirklichen Bewegung ihres am Boden hinziehenden Schattens verglichen, um danach ihre Höhe zu berechnen. Ein anderes Verfahren benutzt eine ausreichend starke Lichtquelle, deren Strahlen in senkrechter oder sonst bekannter Richtung nach der Wolkendecke gesendet werden, und entnimmt aus der scheinbaren Wolkenhöhe, wie sie ein seitlich aufgestellter Beobachter mißt, die wirkliche Höhe. Für solche Bestimmungen diente z. B. die Beleuchtungsvorrichtung des in Wien auf dem Schwarzenbergplatz im Juni 1906 errichteten Leuchtbrunnens (J. Rheden, Meteorol. Zeitschr. **23** 497 1906).

Beobachtungen der Wolkenhöhe und Wolkengeschwindigkeit gaben neben genauerer Kenntnis der Windbewegung auch ein Bild von der Verteilung der Wolken in den verschiedenen Höhenregionen der Atmosphäre. Es fand sich namentlich als Ergebnis der Beoachtungen des „Internationalen Wolkenjahres“ 1896/97, daß gewisse Schichten durch besonders häufige Wolkenbildung ausgezeichnet waren, andere durch große Wolkengeschwindigkeit, und da es sich hierbei nur um horizontale Geschwindigkeiten handelte, so kann man auch sagen,



Fig. 18. Wolkenspiegel. Nach Preisverzeichnis von R. Fuess, in Steglitz bei Berlin aus R. Börnstein Leitfaden der Wetterkunde 2. Aufl. 1906 S. 74 Fig. 15.

daß in der Atmosphäre Schichten mit vorwiegend vertikaler und solche mit vorwiegend horizontaler Bewegung abwechseln. In jenen entstehen die Wolken, in diesen erscheinen sie stärker bewegt.

Die einzelnen meteorologischen Stationen pflegen den Wolkenzug nur in betreff der Richtung und nicht auch der Geschwindigkeit zu bestimmen. Dazu benutzt man vielfach den Wolkenspiegel (Fig. 18), in dessen auf einem Tisch liegender Fläche man das Spiegelbild der Wolke verfolgt, um ihre Zugrichtung aus Vergleichung mit den auf dem Spiegel vorhandenen Richtungslinien zu entnehmen. Außerdem wird meistens noch angegeben, ein wie

großer Teil des Himmels zur Zeit der Beobachtung durch die Wolken bedeckt war. Diese Größe, meist in Zehnteln der Himmelsfläche ausgedrückt, ist zugleich ein Maß für die Menge des Sonnenscheins, die der Stationsort erhält. Erfahrungsmäßig bildet nämlich die durchschnittlich von Wolken freie Himmelsfläche nahezu den gleichen Bruchteil der ganzen sichtbaren Himmelshalbkugel, wie die Stunden mit Sonnenschein im Vergleich zur Summe aller Tagesstunden. Daraufhin kann man die mittlere Bewölkung eines Ortes auch aus seiner mittleren Sonnenscheindauer entnehmen, und diese letztere ist für viele Stationen durch Registriervorrichtungen untersucht worden. Ein häufig hierfür benutzter Apparat ist der in Figur 19 dargestellte



Fig. 19. Sonnenscheinautograph. Aus Preisverzeichnis von Fuess nach R. Börnstein, Leitfaden der Wetterkunde 1906 S. 74 Fig. 16.

Sonnenscheinautograph von Campbell-Stokes, im wesentlichen bestehend aus einer im Freien aufgestellten klaren Glaskugel, hinter deren Schattenseite ein mit Stundeneinteilung versehener dunkelfarbiger Papierstreifen angebracht ist und täglich erneuert wird. Solange die Sonne scheint, werden ihre Strahlen durch die Glaskugel gesammelt und zu einem Lichtfleck vereint, der auf das Papier fällt und beim Fortschreiten der Sonne einen Streifen hineinbrennt. Das Ergebnis derderartiger Aufzeichnungen wird entweder durch die Jahressumme der Sonnenstunden ausgedrückt, d. h. die Zahl der Stunden, in denen die Sonne hell genug schien, um auf dem Papier des Sonnenscheinautographen eine Spur einzubrennen, oder man drückt die wirklichen Sonnenstunden in Prozenten der möglichen, d. h. der gesamten Tagesstunden aus. In diesem letzteren Maß beträgt z. B. die Sonnenscheindauer auf den britischen Inseln 30%, in Deutschland 38, Italien 52, Batavia 54, Kimberley 74%. Wie Staub und Rauch der Großstadt den Sonnenschein trüben, zeigt der Vergleich von Hamburg (23%) mit dem nahe dabei gelegenen Meldorf (30%). In landwirtschaftlicher Hinsicht ist die Sonnenscheindauer von hoher praktischer Bedeutung wegen ihrer Beziehungen zur Anbaufähigkeit einzelner Pflanzen (Zuckerrüben usw.).

5. **Niederschlag.** Bei Besprechung der verschiedenen Feuchtigkeitsstadien, die im aufsteigenden Luftstrom auftreten, wurden bereits einige Formen des Niederschlages erwähnt. Ehe wir auf diese (Regen, Schnee, Hagel) näher eingehen, seien zuerst die Niederschlagsformen geschildert, die in unmittelbarer Nähe des Bodens entstehen. Dahin gehören zunächst Tau und Reif, die sich bei Temperaturen über oder unter 0° auf der erkalteten Oberfläche des Bodens finden. Mit Unrecht spricht man von einem „Fallen“ des Taus oder Reifs, denn beide kommen nicht von oben, sondern von unten aus der wärmeren und feuchteren Bodenschicht, die unter der Oberfläche liegt. Das Wasser, welches hier verdampft, schlägt sich an der kälteren Oberfläche in Form von Tröpfchen oder Eisnädelchen nieder und bildet da Tau oder Reif. Die günstigsten Verhältnisse für deren Entstehung sind also dort gegeben, wo unter einer stark erkaltenden obersten Bodenschicht sich eine feuchte und wärmere Schicht befindet. So bereift oder betaut z. B. eine Rasenfläche bei klarem Abendhimmel recht stark, weil die große Oberfläche der Grashalme viel Wärme ausstrahlt und in hohem Grade abgekühlt wird, während andererseits die Wurzelschicht des Grases durch die Halme gegen Ausstrahlung geschützt ist und von der vorhandenen Feuchtigkeit erhebliche Mengen verdampft, die nun an den kalten Halmen wieder kondensiert werden. Ausgeschlossen ist Taubildung auf undurchlässigem Boden, der keine Feuchtigkeit herausläßt. Auf städtischem Steinpflaster kann man oft sehen, wie nur die zwischen den Steinen befindlichen Fugen bereift sind, die undurchlässigen Steine aber nicht. Käme der Tau von oben durch Tröpfchenfall aus der Luft, so müßte seine Entstehung von Nebel begleitet sein, was bekanntlich nicht zutrifft. Dagegen stammt aus der Luft die Feuchtigkeit, welche am Boden als Beschlag, Glatteis und Rauhreif auftritt. Beschlag erscheint als ein feuchter Ueberzug des Bodens, wenn dampfhaltige wärmere Luft über kälteren Boden streicht und an diesem Flüssigkeit kondensiert wird. Sinkt die Temperatur dann unter 0°, so gefriert der Ueberzug zu Glatteis. Vielleicht findet zuerst Ueberkaltung statt, bis etwa eine

herabfallende Schneeflocke oder ein Eisstückchen mit dem unter 0° abgekühlten Beschlag in Berührung kommt und das Wasser zum raschen und darum nicht kristallinischen Gefrieren bringt. Auch beim Entstehen des Rauhreifs scheint Ueberkaltung wesentlich zu sein. Er bildet sich, wenn Luft von wenig unter 0° mit Wassertröpfchen gemengt gegen Bäume und sonstige feste Körper weht. Bei deren Berührung, namentlich wo schon Eis vorhanden ist, erstarren die überkalteten Tröpfchen und überziehen die festen Gegenstände mit einer dem Wind entgegenwachsenden Schicht zusammengeballter Eiskörnchen. Namentlich in Gebirgsgegenden häuft sich der Rauhreif stellenweise so massenhaft an, daß z. B. Telegraphenstangen auf den Durchmesser mehrerer Meter anwachsen können. Für freigespannte Telegraphendrähte ist in solchen Gegenden der Rauhreif verhängnisvoll, weil er sie durch starke Belastung zum Reißen bringt. Auch die Anemometer der Bergobservatorien pflegen bei Rauhreif alsbald festzufrieren.

Ueber die Entstehung des Regens im aufsteigenden Strom (Regenstadium) wurden schon oben berichtet; diejenigen Tropfen bilden den Regen, welche so groß sind, daß sie rascher fallen, als die umgebende Luft aufsteigt, und daß sie außerdem den Boden erreichen, ehe sie verdampfen. Die Größe der Regentropfen, namentlich der bei einem Regenfalle vorkommenden kleinsten Tropfen ist also zugleich ein Maß für die Geschwindigkeit des aufsteigenden Stromes. Durch sorgfältige Versuche hat P. Lenard (Meteorol. Zeitschr. **21** 249 1904) jene Tropfengrößen festgestellt, die von aufsteigenden Luftströmen bestimmter Geschwindigkeit gerade im Schweben gehalten werden, und vermochte danach anzugeben, wie rasch in der Atmosphäre ein aufsteigender Strom sich bewegte, wenn er Regentropfen bestimmter Größe herabfallen ließ. Für Tropfendurchmesser von 0,01; 0,1; 0,5; 1; 3; 5 mm betrug die Geschwindigkeit des steigenden Stroms 0,0032; 0,32; 3,5; 4,4; 6,9; 8,0 m. Tropfen von mehr als 5,5 mm können nur vorübergehend bestehen, sie fallen in Luft so schnell (8 m in der Sekunde) und mit so starker Reibung, daß sie nach wenigen Sekunden zerspringen. Daher vermag bei einem aufsteigenden Strom von mindestens 8 m Geschwindigkeit Regen überhaupt nicht herabzufallen. Die Bildung der Tropfen findet wahrscheinlich in der Weise statt, daß durch Kondensation von Stäubchen und sonstigen Ansatzkernen sehr kleine und gleichmäßige Tröpfchen entstehen, die dann bei Berührung paarweise zusammenfließen. Es ist wahrscheinlich, daß nur gleichgroße Tröpfchen sich vereinigen und daß ebenso auch die größeren Tropfen, die sich im parallelen Fallen anziehen, paarweise in gleicher Größe zusammenfließen, denn man hat bei zahlreichen Regenfällen vorzugsweise solche Tropfengrößen beobachtet, die zueinander im Verhältnis der Zahlen 1:2:4:8 standen und also ein paarweises Zusammenfließen gleichgroßer Tropfen erkennen ließen (A. Defant Wien. Sitzber. **114** 585 1905). Nach anderen Gesetzen häufen sich die im Schneestadium durch Kondensation erzeugten kleinen Eisnadeln zusammen, nämlich entweder in langsamer Kristallisation zu sechsstrahligen Flocken, oder durch weniger regelmäßige Aneinanderlagerung zu fast strukturlosen Graupeln. Die Entstehung des Hagels wurde vorher bei Besprechung des Hagelstadiums geschildert, wobei sich ergab, daß starker aufsteigender Strom und in der unteren Luftschicht eine über 0° liegende Temperatur die notwendigen Vorbedingungen der Hagelbildung sind. Oftmals entsteht Hagel in der Höhe und findet beim Herabfallen so warme Luft, daß er am Boden im geschmolzenen Zustand als Platzregen anlangt. Dies wird wahrscheinlich gemacht durch den Verlauf so manchen Unwetters, das mit Platzregen beginnt und mit Hagel endet, weil nämlich durch Schmelzen der ersten Hagelmassen die Wärme der unteren Luftmassen aufgezehrt ist und der Rest dann ungeschmolzen herabkommt. Dieselbe Deutung kann auch der Umstand finden, daß erfahrungsmäßig im Gebirge die Zahl der jährlichen Hagelfälle erheblich größer zu sein pflegt als in benachbarten Talstationen, denn je längere Wege die Hagelkörner bis zum Boden durchfallen müssen, um so eher werden sie dabei schmelzen.

Man bezeichnet die Stärke des Niederschlags durch jene Höhe, in der das herabgefallene Wasser, nötigenfalls nach vorausgegangener Schmelzung, den Boden bedecken würde, wenn es weder versickern oder abfließen noch verdampfen könnte. Als Durchschnittszahlen für die Erdteile ergeben neuere Untersuchungen nach R. Fritzsche (Diss. Halle 1906) folgende jährlichen Regenhöhen:

Europa	595	mm
Afrika	807	„
Asien	607	„
Australien	475	„
Nordamerika	631	„
Südamerika	1424	„

Nach geographischer Breite geordnet beträgt die mittlere jährliche Regenhöhe in 70 bis 80° Nordbreite 259 mm, wächst gegen Süden bis zu 1716 und 1812 mm in 0 bis 10° nördlicher und südlicher Breite, nimmt dann ab bis 573 mm in 30 bis 40° Südbreite, um

wieder auf 1021 mm in 50 bis 60° Südbreite zu wachsen. Im einzelnen sind die Niederschlagshöhen örtlich ebenso mannigfach verteilt, wie die Vorbedingungen für die Entstehung der regenbringenden aufsteigenden Luftströme. In Deutschland hat nach H. Meyer (Archiv der Seewarte **11** Nr. 6 1888) die Nordseeküste etwa 770 mm jährlichen Niederschlag, die Ostseeküste 660 mm, das norddeutsche Flachland 590 mm, Süddeutschland durchschnittlich und mit großen örtlichen Abweichungen 1230 mm. Gebirge und auch geringe Bodenerhebungen vermehren durch Erzeugung vertikaler Luftbewegung den Niederschlag erheblich, namentlich auf der Windseite, während auf der Leeseite durch den absteigenden Luftstrom eine Verminderung, der Regenschatten des Gebirges erwirkt wird. Eine Vermehrung des Niederschlages durch Wald hat man oft behauptet, indessen scheint hier ebenso wie bei der früher angenommenen Wärmewirkung des Waldes durch mangelhafte Beobachtungen ein Einfluß vorgetäuscht zu sein, der in Wirklichkeit kaum vorhanden ist. Die nachher zu beschreibende Messung der Niederschlagshöhe hängt, wenn nicht besonderer Windschutz angewendet wird, derartig vom Winde ab, daß die Regentropfen und mehr noch die Schneeflocken teilweise zur Seite geweht und dem Regenwasser entzogen werden können. Im Walde herrscht aber natürlicher Windschutz und läßt im Regenmesser mehr Wasser sich ansammeln als bei gleichem Niederschlag im freien Felde. Seit man diese Schwierigkeit beseitigt hat, zeigte sich, daß im Walde nur wenig mehr Niederschlag fällt als im Freien, nämlich nur etwa soviel mehr, wie wenn statt der Bäume eine doppelt so hohe Bodenerhebung da wäre. Dagegen ist eine andere Wirkung des Waldes auf den Niederschlag von sehr hoher wirtschaftlicher Bedeutung gegeben in der regelmäßigeren Verteilung des Regenwassers. Fällt Regen auf unbewaldetes Gebiet, so fließt das Wasser alsbald in die Täler und wird durch die Flüsse dem Meere zugeführt. Bei starkem Niederschlag, namentlich im Gebirge, kann der fruchtbare Boden durch die zu Tal strömenden Gewässer zerstört werden, und den Tälern droht Ueberschwemmung; und bei Ausbleiben des Niederschlages trocknet der Boden aus, es droht Dürre. Ist dagegen der Boden mit Vegetation, namentlich mit Wald bedeckt, so saugt er große Mengen des Niederschlages auf und gibt sie nur langsam an das tiefere Land ab. Zuviel Niederschlagswasser wird im Wald teilweise festgehalten und kann keinen Schaden durch rasches Abfließen anrichten, und bei zu wenig Niederschlag sendet der Wald von seinem angesammelten Wasservorrat ausreichende Mengen herab, um Dürre zu verhüten.

Die große wirtschaftliche Bedeutung des Niederschlages und seine Fähigkeit, sowohl Segen wie Unheil zu stiften, läßt es begreiflich erscheinen, daß man von jeher eine künstliche Beeinflussung der Niederschlagserscheinungen erstrebt hat. Ursprünglich sind solche Versuche gewiß religiösen Vorstellungen zuzuschreiben; gehörte doch das „Wettermachen" in alter Zeit zu den regelmäßigen Künsten der mit dem Satan im Bunde stehenden Zauberer und Hexen. Aber bis in unsere Tage kann man ähnliche Bestrebungen bemerken, die trotz offenbarer Erfolglosigkeit doch immer wieder ernsthaft erwogen und ausgeführt werden. Eines der häufigsten Mittel zur Beeinflussung des Wetters ist das Schießen. So berichtet Bates (Meteorol. Zeitschrift **25** 454 1908) aus dem Jahre 1907 von Versuchen zur Erzeugung von Regen, die in Neuseeland bei sehr großer Dürre auf öffentliche Kosten unternommen wurden. Erhebliche Mengen von Dynamit und Schießpulver wurden freiliegend oder in Kanonen abgefeuert, wozu der genannte Berichterstatter bemerkt, die Explosionen hätten augenscheinlich keine größere Wirkung in der Luft gehabt als das Anzünden eines Zündhölzchens in einem Zimmer haben kann. Eine andere Wirkung noch meinte man von Explosionen erwarten zu dürfen, nämlich die Verhinderung des Hagels. Man glaubte der drohenden Wolke das Material zur Hagelbildung entziehen zu können, indem die Tröpfchen durch die Erschütterung des Schießens zusammenlaufen und als harmloser Regen oder Schnee herabfallen sollten; oder man glaubte das gleiche zu bewirken, indem der vom aufwärts abgefeuerten Geschütz emporsteigende Rauchring viele Kondensationskerne in die Wolke brachte. Die österreichische Regierung berief zur Be

Fig. 20. Regenmesser. Aus Preisverzeichnis von R. Fuess abgedruckt in R. Börnstein, Leitfaden der Wetterkunde 1906 S. 99 Fig. 21.

sprechung dieses Hagelschießens im Juni 1902 einen internationalen Kongreß nach Graz, dessen Beratungen dann zu vorurteilsfreier Untersuchung des Hagelschießens und zur Erkenntnis seiner Wirkungslosigkeit führte (J. M. Pernter, Meteorol. Zeitschr. **24** 97 1907).

Zur Messung des Niederschlages dient der Regenmesser (Fig. 20), ein metallenes Auffanggefäß mit meistens 200 qcm großer, sorgfältig horizontal gestellter Oeffnung, innen mit Trichter und Sammelgefäß versehen. Die angesammelte Niederschlagsmenge wird täglich zur bestimmten Zeit herausgeholt und mittels kalibrierten Zylinders gemessen, bei Schneefall nach vorangegangenem Auftauen. Eine bedeutende Fehlerquelle entsteht bei dieser Messung durch den Wind, der von dem Körper des Regenmessers aufgehalten wird und deswegen über der Auffangöffnung rascher weht, als es dort geschähe, wenn kein Regenmesser darunter stünde. Deshalb werden die Regentropfen, die ohne Wind in die Oeffnung fielen, teilweise vom Wind zur Seite geweht, ohne daß ein entsprechendes Mehr von der Windseite hereingeweht wird, und der Inhalt des Regenmessers erscheint zu klein um einen Betrag, der vom Winde abhängt und außerdem noch mit der Art des Niederschlages wechselt; denn große Regentropfen werden vom Winde weniger abgelenkt, kleine mehr, und Schneeflocken noch mehr. Um dies zu hindern, kann man nach F. E. Nipher's (Proc. Amer. Assoc. for the Adv. of Sc. St. Louis Meeting 1878) Vorschlag einen Schutztrichter anbringen, dessen oberer weiter Rand die Oeffnung des Regenmessers in gleicher Höhe umgibt, während der untere enge Teil am unteren Teil des Regenmessers befestigt ist. Diese Vorrichtung veranlaßt gewissermaßen durch Keilwirkung die heranströmende Luft, nach unten auszuweichen, so daß über der Oeffnung des Regenmessers der Wind nicht stärker weht, als es ohne Anwesenheit des Apparates der Fall wäre. Der Schutztrichter hat sich bereits vielfach bewährt und wird es vielleicht noch mehr, wenn man nach einem neuen Vorschlag von R. Billwiller (Meteorol. Zeitschr. **27** 193 1910) im unteren Teil Oeffnungen anbringt, um das Vollschneien des Trichters zu verhüten.

6. Wetter. Das Zusammenwirken der vorstehend erwähnten und besprochenen meteorologischen Elemente bildet das Wetter. Dabei ist wiederum von besonderer Bedeutung der schon mehrfach geschilderte aufsteigende Luftstrom; er ist gebunden an eine Gegend niedrigen Drucks und zeigt verschiedene Erscheinungsformen je nach der Gestalt dieses Tiefdruckgebiets. Wir betrachten zuerst jene, die über langen, schmalen Streifen des Bodens auftreten und als Böen bezeichnet werden. Stellt man, wie üblich, die Verteilung des Luftdrucks über einem größeren Gebiet durch Isobaren, d. h. Linien gleichen Luftdrucks dar, so finden sich darin oftmals Ausbiegungen, die als örtliches Eindringen des niederen in den höheren Druck gedeutet werden können. Meistens tritt eine solche Ausbiegung nicht vereinzelt auf, sondern ist von ähnlichen Formen in den benachbarten Isobaren begleitet, so daß man quer zur Schar der Isobaren eine Linie durch alle jene Ausbiegungen ziehen kann, auf welcher der Luftdruck kleiner ist als zu ihren beiden Seiten. Ein solcher Streifen niederen Druckes heißt Böenlinie; Figur 21 zeigt dafür

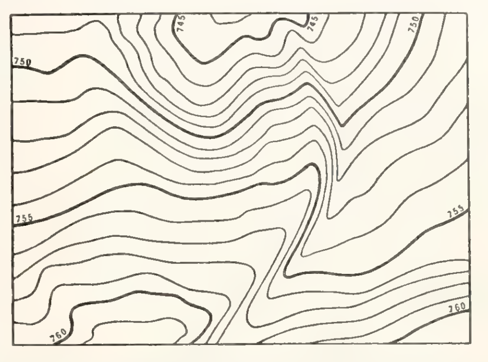


Fig. 21. Böenlinien in den Isobaren vom 27. August 1890 (Gewitter). Aus R. Börnstein, Leitfaden der Wetterkunde 1906 S. 131 Fig. 33.

ein Beispiel, das die Druckverteilung während eines Gewitters wiedergibt. Die Böenlinie schreitet mit dem Winde fort, also in der Isobarenrichtung und den kleineren Druck links behaltend. Dabei schreiten zugleich alle die Einzelvorgänge mit der Böenlinie weiter, die zum Wesen des aufsteigenden Stromes gehören, und ein Beobachter kann folgendes dabei wahrnehmen. Wenn er sich zunächst vor der Front der heranziehenden Böe befindet, bemerkt er langsames Sinken des Luftdrucks und geringen Wind, vielleicht auch vorübergehend Windstille, denn obwohl der aufsteigende Strom die Luft von vorn und rückwärts ansaugt, ist doch diese gegen die Böe gerichtete Bewegung an der Vorderseite dem herrschenden Winde entgegengesetzt, und es weht also vor der Böe nur ein Wind, dessen Stärke dem Unterschiede jener beiden Bewegungen gleichkommt. Darum ist auf der Vorderseite der Wind meist schwach, zuletzt aber gegen die heranziehende Böe gerichtet, so daß man oftmals beobachten kann, wie diese und das begleitende Gewitter „gegen den Wind" heraufzieht. Ueber der Böe erblickt der Beobachter als Wirkung des aufsteigenden Stromes

einen Wolkenstreifen; ist die Böe lang genug, so erscheint die Höhe des Wolkenstreifens rechts und links an den Enden perspektivisch verkleinert, so daß er die Gestalt eines Bogens oder Gewölbes annimmt, unter dem die Luft mit Regen erfüllt ist und hellgrau erscheint. Ist die Böe dann bis zum Beobachter fortgeschritten, so tritt plötzliche rasche Druckzunahme ein, entsprechend den an der Rückseite dicht zusammenliegenden Isobaren. Ein registrierendes Barometer zeichnet alsdann die sehr charakteristische „Gewitternase" auf, die auch ohne Gewitter bei keiner Böe ganz fehlt und eine nach bisherigem Sinken steil aufsteigende Linie mit nachfolgendem langsamen Sinken darstellt. Zugleich stellt sich der von der Rückseite auftretende starke Wind in der Zugrichtung ein, den man wohl auch für sich allein als Böe bezeichnet, und der aus der Vereinigung der vom aufsteigenden Strom angesaugten Luft mit dem herrschenden Wind entsteht. Ihm ist zum Teil auch der hohe Druck an der Rückseite der Böe zuzuschreiben. Dieser Wind ist kalt, weil er mit herabfallenden Regentropfen durchsetzt aus der Höhe kommt und seine dynamisch erzeugte Wärme sogleich an die Wassertropfen abgibt. Der im aufsteigenden Strom entstehende Niederschlag kann je nach der Höhe und Stärke der Böe ganz fehlen (Staubböe), oder als Graupel, Hagel, Platzregen herabfallen, gewöhnlich erst nach Einfallen des starken Windes, nämlich verspätet um die Dauer des Herabfallens. Ist die Kondensation kräftig genug, so pflegt Gewitter mit der Böe verbunden zu sein, worüber im Artikel „Atmosphärische Elektrizität" näheres gesagt ist. Die allermeisten Böen treten nicht vereinzelt auf, sondern es folgen mehrere aufeinander, gewöhnlich in der Nähe eines größeren Tiefdruckgebiets, in dessen Kern die Verlängerungen der Böenlinien zusammentreffen. Kennzeichen für solche Wetterlage ist geschlängelte Form der Isobaren, und die Schar der Böenlinien zieht dann um das links von ihnen liegende Tief herum.

Betrachtet man das Wetter eines größeren Gebietes, etwa das eines ganzen Erdteils, so ist auch dafür die Luftdruckverteilung charakteristisch. Insbesondere treten in der Isobarenkarte die Gebiete hervor, in welchen der Luftdruck niedriger, und diejenigen, in welchen er höher ist als ringsum, und die in beiden Fällen von geschlossenen Isobaren umgeben sind. Solche Druckzentren bezeichnet man als Tiefdruckgebiete, barometrische Minima, Depressionen oder Zyklonen, und andererseits als Hochdruckgebiete, barometrische Maxima oder Antizyklonen, und die jeweilige Witterung steht zu den in der Wetterkarte vorhandenen Druckzentren in vielfacher und enger Beziehung. Nahezu eine jede Wetterkarte läßt erkennen, wie die Luftbewegung in der Umgebung der Tiefs und Hochs nach Maßgabe des barischen Windgesetzes verläuft. Ohne Erddrehung würde am Boden der Wind geradeswegs vom hohen zum niederen Druck wehen, also auf den Radien in das Tief hinein und aus dem Hoch heraus. Die von der Erddrehung erzeugte Rechtsablenkung erzeugt in beiden Fällen spiralige Windbahnen, deren Drehungssinn für die nördliche Erdhälfte auf Figur 22

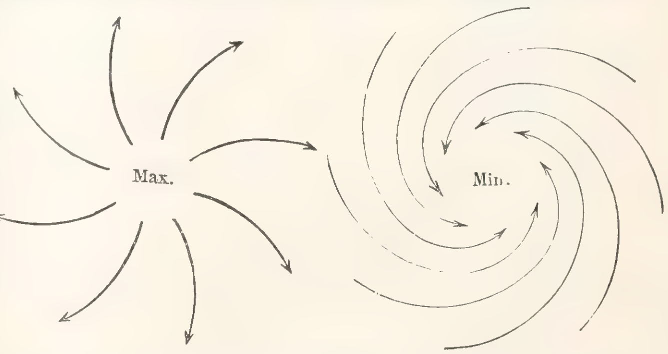


Fig. 22. Windbahnen in der Umgebung der Tief- und Hochdruckgebiete auf der nördlichen Erdhälfte. Aus R. Börnstein, Leitfaden der Wetterkunde 1906 S. 154 Fig. 44.

ersichtlich gemacht ist. Dabei entsteht vermöge der gekrümmten Windbahnen eine nach der äußeren Seite der Krümmung gerichtete Zentrifugalkraft, welche beim Tief nach rechts und daher gleichsinnig mit der Wirkung der Erddrehung gerichtet ist, beim Hoch nach der linken Seite des Windes und demnach entgegen der Erddrehung. Hieraus ergibt sich die verstärkte Rechtsablenkung beim Tief, da die Luftmassen auf längerem Umwege zum geringeren Druck hinführt und die durch tägliche Erfahrung bestätigte größere Windstärke in der Gegend des Tiefs erzeugt, während das Hoch durch geringere Windstärken ausgezeichnet ist. Ferner ist inmitten der Druckzentren vertikale Luftbewegung vorhanden, im Tief Aufsteigen der unten allseitig heranfließenden Luft, die oben dann abfließt, im Hoch Absteigen der in der Höhe heranströmenden und unten aus der Mitte herausfließenden Luftmassen. Demnach muß das Tief die Erscheinungen des aufsteigenden Luftstroms zeigen, nämlich Bewölkung und Niederschläge, das Hoch dagegen den klaren Himmel des absteigenden

Stromes. Aus diesen Unterschieden ergibt sich wiederum die Beeinflussung der Strahlung und der Temperatur durch die Druckzentren, denn die Wolkendecke des Tief hindert Ein- wie Ausstrahlung, während der klare Himmel des Hoch beide fördert. Die jeweils stärkere Strahlung tritt daher namentlich beim Hoch hervor, im Sommer bei stärkerer Einstrahlung bringt es uns Hitze, im Winter bei überwiegender Ausstrahlung bringt es Kälte, während das Tief umgekehrt im Sommer Abkühlung, im Winter Erwärmung hervorruft.

Hiernach ist es begreiflich, daß man sich gewöhnt hat, die barometrischen Hoch- und Tiefdruckgebiete als die eigentlichen Beherrscher des Wetters anzusehen, und daß die Aufgabe der Wettervorhersagung hauptsächlich darin besteht, Aenderungen im Verhalten und Bewegen dieser Gebiete rechtzeitig zu erkennen. In dieser Hinsicht hat die Erfahrung mancherlei Regeln gegeben. Durch langjährige Verfolgung der Zugstraßen, auf denen die Tiefs fortschreiten, glaubte man eine Anzahl dieser Wege festgelegt zu haben, auf denen hauptsächlich das Fortschreiten geschähe; indessen hat die Erfahrung nachgerade immer deutlicher gezeigt, daß jene Zugstraßen doch nicht häufig genug von den Tiefs beschritten werden, um danach einigermaßen sichere Vorhersagen zu ermöglichen. Aehnlich erging es mit den „Wettertypen“, nämlich einer Anzahl häufig vorkommender und an bestimmte Stellungen von Hochdruckgebieten geknüpfter Wetterlagen, die man zur rechtzeitigen Erkennung der jeweiligen und bevorstehenden Witterung zu benutzen versuchte, ohne doch dauernden praktischen Erfolg dabei zu erzielen.

Die örtliche Beobachtung kann freilich viele wichtigen Einzelheiten zum Verständnis der allgemeinen Wetterlage liefern. So ist aus dem Verhalten des Luftdrucks zu entnehmen, ob ein in Europa vorhandenes Druckzentrum sich uns nähert oder von uns entfernt. Die Annäherung eines Tiefs erkennt man insbesondere daran, daß es rechts vor sich eine Wolkenschicht, den „Cirrusschirm“, zu zeigen pflegt. Namentlich aber liefert die Windrichtung mit ihren Aenderungen steten Aufschluß über das Verhalten der Tiefs und Hochs. Wie die Figur 22 erkennen läßt, ist der Vorübergang dieser Gebilde mit ganz bestimmten Aenderungen der Windrichtung verbunden. Vorwiegend häufig ziehen die Tiefs von West nach Ost durch Nordeuropa, so daß sie also nördlich von Deutschland vorübergehen. Dann haben wir zuerst Südwestwind und sehen ihn über West nach Nordwest herumgehen. Wenn, was minder häufig geschieht, das Tief südlich von uns durch Europa ostwärts wandert, sehen wir den zuerst auftretenden Südostwind über Ost nach Nordost herumgehen. Die erstgenannte Drehungsrichtung (im Uhrzeigersinn) bezeichnet man als Rechtsdrehen oder Ausschießen des Windes die letztere als Zurückdrehen oder Krimpen. Eine Betrachtung der für Hoch- oder Tiefdruckgebiete charakteristischen Windverteilung (Fig. 22) läßt erkennen, daß ganz allgemein ein Rechtsdrehen des Windes dann stattfindet, wenn der Beobachter sich auf der rechten Seite des vom Druckzentrum eingeschlagenen Weges befindet, und daß er umgekehrt den Wind zurückdrehen sieht, wenn das fortschreitende Druckzentrum dem Beobachtungsort seine linke Seite zuwendet. Es ist dabei nicht einmal immer nötig, die zeitliche Aenderung der Windrichtung abzuwarten, denn die Tiefs sind ja Luftwirbel, die von dem herrschenden Winde mitgenommen werden, und weil nun dieser Wind unten durch die Reibung des Bodens geschwächt wird und sich in der Höhe stärker entfalten kann, pflegt der Oberteil des Tiefs rascher als der untere fortzuschreiten, so daß die Achse des Tiefdruckwirbels nicht ganz aufrecht steht, sondern meist in der Fortschreitungsrichtung etwas vorgeneigt ist. Dann treten die einzelnen Windrichtungen in der Höhe bereits früher als am Boden auf, und man kann daraus die Regel entnehmen, daß das Tief beim Fortschreiten den Beobachter rechts oder links behalten wird, je nachdem der Oberwind, kenntlich an der Wolkenbewegung, gegen den unteren Wind nach rechts oder links abweicht. Weil nun für uns in Deutschland die meisten Tiefs nördlich vorbeiziehen und uns also rechts liegen lassen, sehen wir vorwiegend häufig den oberen Wind rechts gegen den unteren abweichen.

Mancherlei Regeln hat die Erfahrung für das Fortschreiten der Druckzentren, namentlich der Tiefs, geliefert. So z. B. diese, daß die Tiefdruckgebiete, gleich dem Wind, mit dem sie gehen, vorwiegend den höheren Druck auf der rechten Seite zu behalten suchen; ferner, daß sie auch die höhere Temperatur vorwiegend rechts lassen, jedoch überwiegt hierbei der Einfluß der Druckverteilung, und wenn Druck und Temperatur nach dieser Regel dem Tief entgegengesetzte Bewegungen zuweisen, bleibt es meist an seinem Platze und versendet nur einzelne Teiltiefs in der Isobarenrichtung mit dem Winde. Nach G. Guilbert (Nouvelle prévision du temps, Paris Gauthier Villars 1909) ist von Wichtigkeit die Beziehung zwischen Gradient und Windstärke; gewöhnlich ist in der Umgebung des Tief oder Hoch die Windstärke nicht nur verschieden verteilt, sondern steht auch in verschiedenem Verhältnis zum Gradienten (vgl. S. 578),

so daß auf der einen Seite der Wind stärker weht, als dem dortigen Gradienten entspricht, auf der anderen Seite umgekehrt. Auf der Seite des verhältnismäßig zu starken Windes wird nun die Luft rascher in das Tief hinein- oder aus dem Hoch herausfließen, und dort verringert sich demnach die Tiefe oder Höhe des Druckzentrums. Hieraus ergibt sich die Regel, daß das Tief oder Hoch sich von der Gegend fortbewegt, in der der Wind zu stark im Verhältnis zum Gradienten ist.

Neuerdings hat man an Stelle der Druckverteilung mit ihren Hoch- und Tiefdruckgebieten die in Gang befindlichen Aenderungen des Drucks aufmerksamer zu verfolgen begonnen und nicht bloß den jeweiligen Barometerstand durch Isobaren dargestellt, sondern auch die Zu- oder Abnahme des Luftdrucks, die die Beobachtungsstationen in den letzten 24, 12, 6 oder 3 Stunden erkennen ließen, in Karten eingetragen und durch Linien die Orte gleicher Aenderung verbunden.

Diese als Isallobaren bezeichneten Linien gleicher Luftdruckänderung umschließen die Gegenden raschester Aenderung, nämlich die Fall- und Steigegebiete, und man ist zurzeit an vielen Stellen beschäftigt, die Eigenschaften dieser Gebiete und die Regeln, nach denen sie sich bewegen, aus der Erfahrung herzuleiten.

Die tägliche Zusammenstellung der auf weitem Gebiet stattfindenden Beobachtungen und die rasche Verbreitung ihrer Kenntnis bildet die Aufgabe des modernen Wetterdienstes. Dieser hat den Zweck, die Vorhersagung des Wetters zu ermöglichen, und man kann seine Entstehung auf den schweren Sturm von Balaklava zurückführen, der am 14. November 1854 in der Gegend des schwarzen Meeres große Verheerungen anrichtete, namentlich auch den Land- und Seestreitkräften, die dort aus Anlaß des Krimkrieges versammelt waren, viel Schaden zufügte. Die Erwägung, daß ein Teil dieser Schädigungen hätte vermieden werden können, wenn man am vorhergehenden Tage eine Sturmwarnung gehabt hätte, führte dazu, solche Warnungen aus öffentlichen Mitteln einzurichten. Zuerst in Frankreich, danach in den anderen Kulturländern, wurden derartige Pläne verwirklicht, in Deutschland 1875 bei Begründung der Hamburger Seewarte. In ganz Europa verteilt senden die Beobachtungsstationen täglich das Ergebnis ihrer am Morgen, teilweise auch am Mittag und Abend des Vortags, ausgeführten Ablesungen telegraphisch an die Zentralstellen der Länder, welche diese Nachrichten untereinander alsbald austauschen und so befähigt sind, während des Vormittags die Wetterlage von ganz Europa zu überschauen. Anfänglich begnügte man sich mit der leichteren Aufgabe, aus der gewonnenen Kenntnis der am Morgen eingetretenen Wetterlage die bevorstehenden Aenderungen von Luftdruck und Wind herzuleiten und die entsprechenden Nachrichten an die Küsten zu senden; namentlich Sturmwarnungen wurden ausgegeben und sowohl telegraphisch als auch durch weithin sichtbare Signale verbreitet. Während auf diese Art die Bedürfnisse der Schiffahrt im wesentlichen befriedigt wurden, legt die binnenländische und namentlich die landwirtschaftliche Bevölkerung naturgemäß wenig Wert auf diese Nachrichten und verlangt die Möglichkeit, Niederschlag und Temperatur des kommenden Tages vorher zu wissen. Mit Rücksicht auf die sehr viel schwierigere Erfüllung dieser Forderung, weil die örtlichen Besonderheiten hierbei wesentlich stärker hervortreten, als bei Druck und Wind, sah man sich genötigt, die Bezirke des Wetterdienstes zu verkleinern. In Deutschland vermochte die Seewarte nicht das ganze Binnenland mit einigermaßen sicheren Wettervorhersagen zu versorgen, es entstanden entsprechende Anstalten in den Einzelstaaten, denen diese Aufgabe übertragen wurde. Zuerst wurde 1878 im Königreich Sachsen ein besonderer Landeswetterdienst eingerichtet, seitdem vielfach für einzelne Gebiete sowohl von staatlicher als auch privater Seite, und 1906 trat in Norddeutschland der öffentliche Wetterdienst ins Leben, der sich seither zum Reichswetterdienst entwickelt hat. Inzwischen haben auch die Aufgaben und Leistungen solchen Dienstes sich geändert. Glaubte man zuerst, als Haupttätigkeit der Dienstleiter die Verbreitung von Wettervorhersagen ansehen zu sollen, so ist jetzt ihre wesentliche Aufgabe die rasche und weite Verbreitung der Wetterkarten, d. h. also der bekannten Abbildungen, die in einfachen und leicht verständlichen Zeichen die am Morgen eingetretene Witterung darstellen. Auf die rasche und genaue Herstellung dieser Karten und ihre billige, schnelle und weite Verbreitung legt unser Wetterdienst den größten Wert, um durch Mitteilung dieser tatsächlich eingetretenen und von keiner Vermutung mehr abhängigen Wetterlage alle Bevölkerungsteile, die es angeht, instand zu setzen, daß jeder das besondere Wetter des eigenen Wohnorts als Teil der allgemeinen Wetterlage erkennen und die bevorstehenden Aenderungen danach sowie nach örtlichen Zeichen vermuten kann. Zunächst freilich ist dies Ziel noch nicht erreicht; man versendet von den Wetterdienststellen neben den Karten auch Vorhersagen, die im Sommer telegraphisch an alle mit Drahtverbindung versehenen Post-

anstalten, im Winter nur an Abonnenten gehen.

Das Gebiet, aus dem die Dienststellen ihre Nachrichten für die Herstellung der Wetterkarten beziehen, bestand anfänglich aus einem über den größten Teil von Europa verbreiteten Netz von Beobachtungsstationen. Man strebt seine Erweiterung sowohl durch seitliche Ausbreitung als auch durch Einbeziehung der oberen Luftschichten an. Die Benutzung von Schiffsbeobachtungen, die auf drahtlosem Wege dem Festlande übermittelt werden, ist besonders wichtig für Westeuropa, weil die Tiefdruckgebiete ja meistens von Westen kommen und ihre frühzeitige Erkennung gerade dort bisher schwierig war. In den englischen Wetterkarten hat man bereits regelmäßig Nachrichten über die Luftdruckverteilung auf dem Ozean auf Grund drahtloser Schiffsdepeschen, und die Schaffung ähnlicher Einrichtungen für Deutschland wird erwogen. Weiter gediehen ist bei uns bereits die Verwendung von Beobachtungsmaterial aus der Höhe. In Lindenberg (Mark), Hamburg und Friedrichshafen sind Drachenstationen eingerichtet, an denen regelmäßig Registrierapparate mittels Drachen hinaufgesendet werden, worauf die Beobachtungsergebnisse alsbald telegraphisch den Dienststellen zugehen. Auch hier wird noch weitere Ausbildung des Verfahrens und namentlich Vermehrung der Stationen erwogen.

Literatur. *Die wichtigsten Spezialarbeiten sind in dem Artikel zitiert. Hier seien nur einige Lehr- und Handbücher nochmals aufgeführt.* ***J. Hann**, Lehrbuch der Metereologie 2. Aufl., Leipzig 1906. —* ***Derselbe**, Handbuch der Klimatologie, 2. Aufl., Stuttgart 1897. —* ***R. Börnstein**, Leitfaden der Wetterkunde, 2. Aufl., Braunschweig 1906. —* ***W. Trabert**, Meteorologie und Klimatologie, Leipzig und Wien 1905. Die Erdkunde. Herausgegeben von W. Klar 13. Teil.*

R. Börnstein.

Atmosphäre.

Geologische Bedeutung der Atmosphäre.

1. Ueberblick. 2. Allgemeine Bedingungen und Erscheinungen der geologischen Tätigkeit des Windes: a) Die Luftbewegungen: α) Formen der Luftbewegung. β) Bewegungserscheinungen. γ) Windstärke. b) Bedingungen für die geologische Tätigkeit des Windes. c) Allgemeines über Winderosion, Windtransport und Windablagerung. 3. Die regionale Verbreitung der durch Winde bedingten geologischen Erscheinungen: a) Polarregionen. b) Feuchte Regionen. c) Steppengebiete. d) Wüste.

1. Ueberblick. Die Atmosphäre wirkt in geologischer Beziehung teils direkt, teils indirekt. Die indirekten Wirkungen bestehen darin, daß die Luft lediglich das Medium darstellt, in dem sich verschiedenartige Prozesse abspielen. Zu solchen Prozessen muß man alle die zählen, die in erster Linie durch die Feuchtigkeit der Luft hervorgerufen werden, also Tau- und Nebelbildung und Niederschläge oder Gehalt an Ozon, Salpetrige Säure, Ammoniak u. a. Alles dieses bedingt oder befördert die Verwitterung und Abtragung der Gesteine durch das Wasser. Aehnlich steht es mit den elektrischen Vorgängen in der Luft, die in Form des Blitzschlags auch geologische Wirkungen ausüben können (vgl. den Artikel „Blitzröhren"). Im Vordergrunde des Interesses stehen hier die Wirkungen der Luft in Gestalt der Winde und anderer Bewegungen. Allein unter den Wirkungen der Luftbewegungen seien nur die direkten geologischen Kraftäußerungen hier behandelt, die indirekten, zu denen vor allem die Wellenbewegung des Wassers und die Brandung gehören, werden an anderer Stelle erörtert werden (vgl. den Artikel „Meer"). Der Uebersichtlichkeit wegen wird es zweckmäßig sein, den Stoff in zwei Abschnitte zu gliedern. Der erste Abschnitt muß die allgemeinen Bedingungen und Erscheinungen der geologischen Tätigkeit des Windes, der zweite aber die regionale Verbreitung und gesetzmäßige Anordnung der verschiedenen Erscheinungen sowie die daran sich knüpfenden Probleme behandeln.

2. Allgemeine Bedingungen und Erscheinungen der geologischen Tätigkeit des Windes. Es wird zweckmäßig sein zuerst die Luftbewegungen und ihre Mechanik, sodann die Bedingungen der geologischen Tätigkeit des Windes schließlich aber die Beschaffenheit des Materials, seine Herkunft, seinen Transport und seine Ablagerungsformen darzustellen.

2a) Die Luftbewegungen. α) Formen der Luftbewegungen. Wenn in einem Gebiet A ein geringerer Druck herrscht als in einem benachbarten Gebiet B, so erfolgt ein Ausgleich, indem die Luft von B nach A strömt. Diese Luftströmungen sind die Winde.

Auf ihre Entstehungsursachen einzugehen, würde hier zu weit führen. Die Winde sind Luftbewegungen, die der Beobachter als geradlinig empfindet, wenn sie auch im großen sich als Wirbel darstellen mögen, z. B. die wandernden Minima unserer Breiten, die verheerenden Wirbelstürme der Tropen. Im Gegensatz zu den Winden haben die Tromben oder Wettersäulen eine lokale, rasch rotierende aufsteigende Bewegung. Die entstehen bei heißem, meist windstillem Wetter — indes auch bei kräftigem Wind — und fegen mit großer Geschwindigkeit, prasselnd und sausend, über Ebenen und Flüsse, über Berg und Tal. Ihr Durchmesser beträgt wenige Meter bis einige hundert Meter.

Winde und Tromben unterscheiden sich in ihrer geologischen Wirkung nicht unerheblich und müssen daher auseinander gehalten werden.

β) Bewegungserscheinungen. Die Winde bestehen nicht aus gleichmäßig bewegten Luftteilchen, vielmehr aus äußerst komplizierten Systemen von starken und schwachen Stößen; je stärker der Wind ist, um so tumultuöser pflegt er zu sein. Windstöße und Kalmen folgen einander, wie Verdichtungen und Verdünnungen bei longitudinalen Wellen. Rasche Aenderungen von 0 bis 30 m pro Sekunde sind nicht ungewöhnlich. Oft ist die Wirbelbildung stark, oft kaum vorhanden. Reibungen am Boden sowie innere Reibungen dürften die Ursache sein.

In Tromben erfolgt eine schnelle drehende Bewegung nach aufwärts und ihre horizontale Fortbewegung ist meist nicht unregelmäßig wenn auch im großen ganzen nach einer Richtung hin gewendet.

γ) Windstärke. Da die Winde aus verschieden starken Stößen bestehen, muß der Meteorologe die mittlere Windstärke berechnen, allein den Geologen interessieren mehr die extremen Windstärken. Dennoch hat die Beaufortsche Skala, die sich an die Bewegungen der Bäume und die Zerstörungen des Windes hält, sicherlich gerade für den Geologen Bedeutung hinsichtlich der allgemeinen Orientierung über die Windstärke. Um aber auch Zahlen anzugeben, so sei erwähnt, daß nach Köppen die höchste mittlere Geschwindigkeit 28 m pro Sekunde ist; die Maxima sind nicht bekannt, dürften aber 50 m pro Sekunde überschreiten. Auch der Winddruck ist von Interesse. Für England hat das „Wind pressure Comitee" als Maximum 273 kg pro Quadratmeter angegeben. In Nordamerika berechnete man den Winddruck im Tornado vom 20. März 1875 auf 330 kg pro Quadratmeter. Das ist eine ganz gewaltige Kraftentfaltung. Diese wird aber noch dadurch gesteigert, daß der Wind in Stößen angreift. Dadurch geraten die getroffenen Gegenstände in Schwingungen, die sich summieren und schließlich den Umsturz herbeiführen.

Interessant ist die Mohnsche Windskala, die Geschwindigkeit und Winddruck berücksichtigt.

Windstärke	Geschwindigkeit in Sekundenmetern	Winddruck in kg pro qm
0 = still	0— 0,5	0 — 1,5
1 = schwach . . .	0,5— 4	1,5— 1,87
2 = mäßig . . .	4,0— 7,0	1,87— 5,95
3 = frisch	7,0—11	5,96—15,27
4 = stark	11,0—17,0	15,19—34,35
5 = Sturm . . .	17,0—28	34,35—95,4
6 = Orkan	über 28	über 95,4

Lokale Beeinflussung der Windstärke. Die Windstärke hängt nicht nur von dem barometrischen Gradienten, sondern auch von lokalen Verhältnissen ab, namentlich von der Reibung auf dem Erdboden. Daher findet man folgendes.

Die Windstärke ist auf dem offenen Meer am größten und nimmt auf dem Lande wegen der Reibung ab. So hat Loomis die Windgeschwindigkeit für die Union, den Nordatlantischen Ozean und Europa berechnet. Danach ist die mittlere jährliche Windgeschwindigkeit:

Union			Europa	
Binnenl.	O.-Küste	Ozean	W.-Küste	Binnenl.
13,1	15,9	47,9	19,8	12,7

m pr. Sek.

Seewinde haben also im Mittel größere Kraft als Landwinde, Winde in Ebenen mehr als in bergigem Gelände, in vegetationsarmen Ländern mehr als in Waldgebieten. Sodann ist wichtig die Zunahme der Windstärke mit der Höhe infolge Verminderung der Reibung. Vom Erdboden bis zu etwa 3 m nimmt die Geschwindigkeit rasch und oft sprungförmig zu, dann aber langsam:

Höhe	0	3	6	9	12 m
Wind	3,6	8,2	8,7	9,0	9,1 m pr. Sek.

Namentlich zwischen Pflanzen, selbst locker stehenden Stauden, ist die Luftbewegung sehr schwach, selbst bei Sturm. Am energischsten ist die Kraftentfaltung des Windes auf kahlen Berggipfeln.

2b) Bedingungen für die geologische Tätigkeit des Windes. Der Wind ist in manchen Gegenden ein sehr energisch wirkender Faktor und zwar dadurch, daß er Material vom Erdboden abhebt, durch die Luft transportiert und dann fallen läßt. Wie beim Wasser handelt es sich also um Erosion, Transport und Ablagerung, und wie beim Wasser erfolgt auch beim Windtransport eine Saigerung des Materials nach Größe, Schwere und Angreifbarkeit, sowie Umwandlung der Form und Zerkleinerung. Wenn nun aber der Wind wirken soll, so müssen bestimmte Vorbedingungen erfüllt sein. In unserer Klimazone geschieht das nur in beschränktem Umfang und deshalb hat man die Bedeutung des Windes lange unterschätzt.

Die Vorbedingungen für die Wirkung des Windes sind folgende. 1. Windstärke. Ganz allgemein kann man sagen, daß die Wirkung um so größer ist, je stärker der Wind ist. Demgemäß werden Berggipfel, Inseln und Küsten ganz besonders stark beeinflußt werden, weil dort die Winde am stärksten sind.

Gewicht, Größe, Form des Materials. Einmal kommt es auf das absolute

Gewicht an; je leichter ein Gegenstand ist, um so leichter wird er vom Wind fortgetragen. Und zwar entweder hoch durch die Luft oder über den Erdboden hin, und zwar hüpfend, rollend oder schleifend. Auch die Korngröße ist von Wichtigkeit. Ein großer Gegenstand bietet dem Winde eine größere Angriffsfläche dar als ein kleiner, bei gleichem Gewicht wird also der größere leichter fortbewegt. Sodann ist auch die Form nicht unwichtig. Ein rauher Körper mit Vorsprüngen und Winkeln kann noch von einem Wind fortbewegt werden, der einen gleich schweren und großen, aber glatten rundlichen Körper liegen läßt. Im großen ganzen kann man nach Gewicht und Korngröße Staub, Sand, Kies und groben Schutt, unterscheiden, die noch vom Wind beeinflußt werden.

Oertliche Lage des Materials. Ein freiliegender Körper oder aufragender wird leichter fortgeblasen wie einer, der in einer Ecke oder zwischen anderen Gegenständen liegt.

Lockeres Gefüge des Materials. Allein nicht weniger wichtig ist die Art und Weise wie sich die einzelnen Teilchen zueinander verhalten. Sie müssen lose nebeneinanderliegen und nicht zusammenkleben, geschweige zu einer Masse verkittet sein. Alle Faktoren also, die ein Zusammenkitten der Teilchen veranlassen, legen den Wind lahm. Zu diesen Faktoren gehört einmal die Feuchtigkeit. Feuchter Sand backt zusammen und in noch viel höherem Grade tun das Ton und andere feinkörnige Substanzen. Dazu kommt, daß feinkörniges Material schwerer austrocknet, weil die Luft nicht so gut in ihm zirkuliert und damit das Wasser zum Verdunsten bringt. Daher kann es geschehen, daß nach einer Reihe trockener Tage ein Sturm Sand und selbst Kies fortfegt, einem Lehm- und Tonboden dagegen nichts anhaben kann. Bei starkem Winde beginnt das Sandtreiben ziemlich schnell, selbst nach heftigem Regen. Bemerkenswert ist, daß feucht gepflügter Sandboden vom Wind stärker erodiert wird als trocken gepflügter, weil ersterer aufragende Schollen bildet, letzterer dagegen zusammenfällt, wie Free jüngst betont hat.

Aehnlich wie die Feuchtigkeit wirken Salzlösungen. Kochsalz, Soda, Glauber- und Bittersalz, Gips und Kalkkarbonat steigen nicht selten kapillar aus der Tiefe auf und verkitten die oberflächlichsten Schichten. Ist das geschehen, so kann selbst der heftigste Sturm kein Sandkorn abheben. In subtropischen, abflußlosen Steppen ist der Boden oft mit einer dünnen Rinde überzogen, die durch Aufsteigen von Salz oder Kalk in die obersten Lagen entstanden ist und Winderosion verhindert.

Einfluß der Vegetation. Nicht weniger feindlich wirkt die Vegetation, die geradezu der Todfeind der Winderosion genannt werden muß. Denn einmal nimmt die Windstärke zwischen den Pflanzen enorm ab. Sodann hält sich der Boden wegen der Beschattung länger feucht und schließlich verfestigt ihn das Wurzelnetz. So erklärt es sich, daß selbst bei locker stehenden Büschen, Stauden und Kräutern die Windwirkung gering ist. Nur die Tromben machen eine Ausnahme; sie wirbeln überall, wo kahler Boden sich zeigt, selbst zwischen Stauden und Büschen, Staub und Sand empor.

Einfluß der Tierwelt und des Menschen. Die Wirksamkeit der Tiere ist verschiedenartig. Einmal üben die Hufe der Herdentiere in Steppen oft eine große Wirkung aus. Während der Wind von staubigem, festem Boden, auch wenn er ganz kahl ist, nichts abheben kann, wirbeln die Hufe einer Herde, die Scharrfüße der Steppenhühner, jeder Schritt einzelner Tiere und Menschen Staubwolken auf. Die Rinde des durch Salz und Kalkkarbonat oberflächlich verkitteten Staub- und Sandbodens, die oft nur papierdünn, aber fest ist, wird zertreten, so daß der lockere, feine Sand zum Vorschein kommt und nunmehr vom Wind bearbeitet werden kann. Auf einer bewachsenen Düne genügt selbst der Fußtritt eines schweren Tieres, der die Pflanzendecke total vernichtet, um die Winderosion beginnen und eine Windschale entstehen zu lassen. Noch energischer ist das Eingreifen dieser Kraft an Rollplätzen des Wildes; dort wird nicht nur die Vegetation vernichtet, sondern auch lockerer Boden geschaffen, den der Wind forttragen kann. Zu diesen von der Oberfläche ausgehenden Einwirkungen der Herdentiere tritt aber die nicht weniger wichtige Arbeit der wühlenden Bodentiere. Schon in unserem Klima schaffen Milliarden von Tieren, wie Mäuse, Maulwürfe, Ameisen, Insektenlarven, Regenwürmer usw. beständig Erde an die Oberfläche, die vom Regen verwaschen oder vom Wind verweht wird. Viel größer ist die geologische Wirkung der Bodentiere in manchen subtropischen und tropischen Steppen, wo namentlich Ameisen und Termiten, Wühlratten, Mäuse, Kaninchen und andere Steppentiere massenhaft Erde aus ihren Bauen werfen und damit den Hufen und dem Wind immer neues Material liefern.

Der Mensch begünstigt die Winderosion namentlich durch Vernichtung der Vegetation. Nicht nur die Entwaldung, sondern auch die langdauernde Entblößung des Bodens auf den Feldern gibt den Winden Veranlassung zu ausgiebiger Tätigkeit. Am schlimmsten sind die Folgen der Zerstörung

da, wo die Vegetation über altem Flugsand vernichtet wird. Die Dünen der Gascogne, der Frischen und Kuhrischen Nehrung haben nach der Zerstörung der Wälder das heutige Aussehen angenommen und wandern erst seit einigen hundert Jahren. Umgekehrt kann der Mensch, sobald Dünen ihm schädlich werden, durch Bepflanzung sie zum Stillstand bringen unter Benutzung geeigneter Pflanzen, die den Sand befestigen. Auch kann er durch Vernichtung des Wildes die Winderosion lahm legen.

2c) Allgemeines über Winderosion, Windtransport und Windablagerung. Die Tätigkeit des Windes hat viel Verwandtes mit der des Wassers, unterscheidet sich aber auch in manchen Punkten ganz wesentlich von ihr. So wirken beide erodierend, transportierend und ablagernd, doch in anderer Form und mit anderen Resultaten.

Winderosion. Man hat wie bei der Wassererosion Ablation d. h. einfaches Abheben eines losen Gegenstandes und Korrasion, d. h. Bearbeitung des zu zerstörenden Gegenstandes durch die mitgeführte Last zu unterscheiden.

Die Ablation setzt loses Material voraus, das der Wind abheben kann. Die Wirkung wird also um so größer sein, je mehr davon vorhanden ist. Ferner wird sie mit der Höhe über dem Boden wachsen, da die Windstärke mit der Höhe zunimmt. Auch ist es wichtig, daß der Wind stoßweise einsetzt. Dadurch kann er einen losen Gegenstand in Schwingungen versetzen, die sich bei rhythmischen Stößen verstärken, so daß der Gegenstand schließlich umgestürzt wird.

Die Korrasion beruht darauf, daß Staub, Sand und selbst Kies wie Geschosse gegen Hindernisse geschleudert werden. Dadurch wird die Kraft des Windes wesentlich verstärkt, Stücke werden mitgerissen und nun selbst als Geschosse verwendet, oder sie fallen, weil zu schwer, einfach hinab. Der stärkste Wind mit dem gröbsten Material wirkt am meisten. Da nun aber grobes Material nicht hoch fliegt, so ist die Korrasion auf den Boden beim Rollen der Kiesmassen am stärksten und nimmt nach oben hin an Intensität schnell ab, da ja das transportierte Material immer kleiner wird. Theoretisch wird also die Ablation mit der Höhe über den Boden wachsen, die Korrosion abnehmen; allein in Wirklichkeit wird jedes losgerissene Teilchen sofort selbst als Geschoß benutzt, und entsprechend der Windstärke auf Bergen werden auch die umhergeschleuderten Trümmer von erheblicher Größe sein. Also auch auf hohen Bergen wirkt die Korrosion und zwar kräftig.

Der Unterschied zwischen der Wind- und Wassererosion. Das Wasser kann nur abwärts fließen und wirkt überwiegend linear im Verlauf der Talbildungen seltener flächenhaft. Auch erreicht es das Maximum seiner Wirkung am Fuß der Gehänge, nicht auf den Gipfeln. Der Wind dagegen entfaltet flächenhaft seine Kraft, wenn er oft auch nur lokal angreifen kann. Vor allem aber kann der Wind überall hingelangen, auf den Höhen ist er sogar am stärksten.

Transport. Zwischen dem Wasser und dem Wind besteht bezüglich der Transportfähigkeit ein sehr großer Gegensatz; Wasser besitzt nämlich eine viel größere Kraft. Gebirgsbäche tragen Blöcke von vielen Kubikmetern Inhalt mit sich, der Wind aber muß sich mit viel kleineren Lasten begnügen. Es wird zweckmäßig sein bei der nachfolgenden Betrachtung das Material nach seiner Korngröße einzuteilen und daran anschließend seine Herkunft und die Art des Transportes zu erörtern.

Das Material sei in drei Gruppen zusammengefaßt: 1. Grobes Material; 2. Sand; 3. Staub.

1. Grobes Material. Korngröße. Das grobe Material wollen wir mit 3 mm Durchmesser beginnen lassen, die obere Grenze ist unbestimmt, hängt außerdem von rein lokalen Verhältnissen ab.

Herkunft. Alle zerkleinerten Gesteine können vom Wind transportiert werden, namentlich sind Kies- und Schotterlager in Wüsten, sowie der durch trockene Verwitterung — Insolation und Spaltenfrost — entstandene eckige Gesteinsschutt der Gehänge und Gipfel den Stürmen schutzlos ausgesetzt.

Transport. Im allgemeinen wird man mit der Annahme nicht fehl gehen, daß Gesteinstrümmer von über 3 mm Durchmesser nicht mehr durch die Luft fliegen, sondern selbst von Stürmen nur am Boden gerollt werden oder sich hüpfend bewegen. Immerhin sollen auf ebenem Boden in Wüsten bei Orkanen selbst faustgroße Steine noch herumgeworfen werden. Beim Samum oder Chamsin ist die Masse und Geschwindigkeit der auf dem Boden rollenden und fliegenden Kiesel so bedeutend, daß die Schienbeine und Füße des Reisenden aufs schwerste verletzt werden und so das Gehen unmöglich wird. Ohne Kamel ist man verloren. Dieses Tier dagegen ist durch die Schwielen geschützt. Auf Gehängen oder gar auf Berggipfeln können größere Trümmer durch Winde bewegt werden als auf ebenem Boden. Allein die Rolle des Windes besteht dann lediglich darin, die Blöcke aus dem Gleichgewicht zu bringen. Diese rollen dann, der Schwerkraft folgend, hinab. Wenn die Lage solcher Blöcke günstig ist, d. h. wenn der Schwerpunkt hoch über dem Mittelpunkt liegt, und die Basis durch Verwitterung unterminiert ist, können selbst

gewaltige Felsmassen vom Orkan in den Abgrund geblasen werden. Die Alpengipfel werden so von Schutt rein gefegt. Daß ins Rollen geratene Blöcke, auf losen Schutt stürzend, große Rutschungen veranlassen können, bedarf keiner Erörterung.

2. Sand. Korngröße. Als Sand bezeichnet man alle Trümmer von 0,05 bis 2 mm Durchmesser, und zwar hat man folgende Stufenleiter:

Feiner Sand	0,05—0,25 mm
Mittlerer Sand	0,5 1,1 ,,
Grober Sand	0,5 —1,1 ,,
Sehr grober Sand	1,1 —2 ,,
Grand	2 —3 ,,

Alle diese Sande können vom Wind transportiert werden.

Herkunft und Zusammensetzung. Die Entstehung des Sandes, den der Wind transportiert und ablagert, kann recht verschiedenen Ursprungs und verschiedener Entstehung sein. Einmal sind es Sande, die die Brandungswelle aufbereitet hat, sodann sind zerfallene alte Sandsteine oder sonstige sandige Gesteine, wie Lehm, Mergel, Kreide, Grauwacken häufig das Muttergestein. Allein auch Kalk- und Dolomitsand, ja sogar Oolith- und Muschelsande kommen vor. In Wüsten und trockenen Steppen besteht er oft aus dem feinen Grus zerfallener Gesteine der verschiedensten Art und Zusammensetzung, wie Graniten, Gneisen, kristallinen Schiefern, Grauwacken und vielen anderen sedimentären und vulkanischen Gesteinen. Auch Erze, z. B. Titaneisensand, Brauneisensteingrus u. a. kommen in äolischen Sanden vor. Ganz allgemein darf man aber sagen, daß, je länger der äolische Transport und das Hin- und Herwandern des Sandes dauert, um so mehr werden die weicheren Mineralien und Gesteinstrümmer zerrieben und zerstäubt und schließlich bleibt der Quarzsand und wohl auch Erze übrig; letztere freilich meist lokal und in geringer Zahl.

Windstärke. Von Interesse ist die kleine Tabelle Sokolows, der folgende Beobachtungen an trockenem Seesand machte.

Windstärke	max. Größe der Sandkörner
4,5— 6,7 m in d. Sek.	0,25 mm Durchmesser
6,7— 8,4 ,, ,, ,, ,,	0,50 mm ,,
8,4— 9,8 ,, ,, ,, ,,	0,75 ,, ,,
9,8—11,4 ,, ,, ,, ,,	1,00 ,, ,,
11,4—13,0 ,, ,, ,, ,,	1,50 ,, ,,

Entsprechend der Mohnschen Windskala beginnt also das Fliegen eines feinen Sandes mit Windstärke 1, bei Windstärke 2 fliegt mittlerer Sand von 0,25 bis 0,5 mm bei Windstärke 3 grober und bei Windstärke 5 sehr grober Sand.

Selbstverständlich muß der Sand ganz trocken und lose, der Boden kahl sein. Sodann kommt es außerdem aber auf die Neigung des Bodens, die Form der Sandkörner und ihre örtliche Lage zu Vertiefungen, Büschen und sonstigen Hindernissen an.

Transport. Die Tragkraft des Windes ist ziemlich gering und es sind zum Transport erhebliche Windstärken notwendig. Die Form des Transports hängt erstens von dem Verhältnis der Kraft des Windes und dem Widerstand des Objekts ab, sodann aber von dem Widerstand der Reibung des Korns auf dem Boden. Diese Widerstände sind abhängig wie wir sahen, von dem absoluten Gewicht und der Gestalt des Objekts, sowie seiner augenblicklichen lokalen Lage hinsichtlich des Schwerpunktes und der Exposition. Ein auf der Spitze stehendes Korn wird umgeweht, während es, auf der Breitseite liegend, sich nicht rührt. Wenn ein Wind von der Stärke a gerade noch imstande ist, das Korn b zu bewegen, so schiebt er es auf dem Boden entlang, und zwar zunächst ohne Rollen, vielmehr stellt sich das Korn lediglich so ein, daß die Masse rechts und links vom Schwerpunkt gleichmäßig verteilt ist. Es muß der Wind aber nicht nur den Widerstand des Korns, sondern auch die Reibung auf der Unterlage überwinden. Demgemäß ist der Transport auf glattem Boden leichter als auf rauhem und abwärts leichter als aufwärts. Nun hatten wir gesehen, daß der Wind nicht gleichmäßig, sondern stoßförmig bläst. Demgemäß erfolgt auch das Vorrücken der Sandkörner ruckweise. Wenn die Kraft des Windes sich steigert, so verwandelt sich das Spielen des Sandkorns in eine rollende Bewegung. Dadurch wird der Transport, namentlich durch Verringerung der Reibung am Boden wesentlich erleichtert. Das nächste Stadium ist, daß das Korn durch den vom Boden abprallenden Wind gehoben wird. Dann beginnt eine hüpfende Bewegung und wächst die Kraft des Windes noch mehr, so fliegt der Sand hoch in die Luft, um mit dem Nachlassen zu Boden zu fallen und unter Hüpfen und Rollen seine Ruhelage zu erreichen, falls nicht ein neuer Windstoß ihn emporschleudert. So kann der Sand bei starkem Sturm emporgehoben werden, wenigstens der feine, während grober Sand im allgemeinen wohl nur wenig über den Boden hinfliegt, wohl aber auf flachen Gehängen emporgerollt werden kann. Bei einer Windstärke von 15 Sekundenmetern fliegen nach Sokolow selbst 1 mm große Sandkörner „ziemlich hoch“ durch die Luft. Feine Sande können hoch oben in der Luft große Wolkenmassen bilden, die sich längere Zeit schwebend erhalten, namentlich bei heißen aufsteigenden Luftströmen.

Folgen des Transports. Die Form des Transports von Sand durch den Wind hat einige wichtige Umwandlungen zur Folge. Dazu gehört die Abrundung der

Körner. Ein eckiges Sandkorn, das vom Wind herum gerollt wird, wird allmählich abgerundet. Die Ecken werden abgestoßen, geglättet und so entstehen schließlich die runden Körner, die für Dünensand, — aber auch Fluß- und Brandungssand — so charakteristisch sind. Noch ein anderer Vorgang resultiert aus der Art des Transports durch den Wind, nämlich die Saigerung entsprechend dem Widerstand, den das Material dem Winde entgegenstellt. Staub als leichtestes Material trennt sich natürlich am schnellsten. Er wird ausgeblasen, wenn feiner Sand noch still liegt. Und so geht es weiter. Im allgemeinen wird die Korngröße immer gleichartiger, je länger der Transport, bezw. das Hin- und Herwandern dauert. Allein da der Widerstand nicht bloß von der Große, sondern auch von dem spezifischen Gewicht der Substanz abhängt, außerdem aber von der Gestalt der Körner, so ist die Gleichmäßigkeit der Korngröße niemals eine völlige. Außerdem mischt sich ja der Sand der einen Gegend natürlich häufig mit zufliegendem leichteren Sand. Es kommt also immer aufs neue zu Durchmischungen verschiedenen Materials, gerade so wie beim Flußsand. Am gleichmäßigsten dürfte die Korngröße bei dem ausgeworfenen Meeressand sein, der ja schon durch die Brandung und die Strömung im Meer gesaigert worden ist. Wenn aber Solger angibt, daß sich Sand der Küsten und Wüsten daran erkennen lasse, daß letzterer im Gegensatz zu ersterem stets staubig ist, so geht er darin doch wohl zu weit. Die Reinheit der Wüstensande wird von manchen Forschern geradezu betont.

3. Staub. Korngröße. Unter Staub versteht man die feinsten und leichtesten Teilchen, die unter 0,05 mm Durchmesser besitzen und in der Luft zum großen Teil unsichtbar sind. Nur in größerer Menge, namentlich bei auffallender Beleuchtung, werden sie sichtbar.

Herkunft und Zusammensetzung. Der Staub ist sehr verschiedenen Ursprungs. Einmal ist er kosmischer, stark eisenhaltiger Meteoritenstaub, ferner ist er lokal und vorübergehend, manchmal aber auch allgemein in der Atmosphäre verbreiteter vulkanischer Staub. Bekannt ist die Verbreitung der feinsten Aschen des Krakatauausbruches im Jahre 1883, die jahrelang umher schwebten und die leuchtenden Wolken und das strahlende Abendrot hervorriefen. Drittens stammt der Staub der Luft von der Erdoberfläche, von der er durch Wind namentlich in Steppen und Wüsten emporgehoben worden ist. Dieser Staub ist auch kompliziert zusammengesetzt und zwar lokal in ganz verschiedener Weise. Denn seine Bestandteile hängen von den lokalen Gesteinsvorkommen ab. Splitter und Körnchen von Quarz, Kalk, Ton, Mergel, nebst feinsten Kristallen und Kristallteilchen der verschiedenartigsten Mineralien sind am häufigsten. Dazu kommen aber auch organische Bestandteile, wie Aschenreste, Kohlenstäubchen, Fasern von Geweben und Gespinnsten, Blütenstaub, Samen und Sporen, Bakterien u. a. kleine eingetrocknete Lebewesen. Im allgemeinen dürften die anorganischen Bestandteile überwiegen, namentlich in Wüsten.

Entstehung des Staubes. Aus der Angabe über die Herkunft des Staubes geht z. T. auch seine Entstehung hervor, so die des kosmischen, vulkanischen, organischen Staubes. Nähere Angaben erfordert nur die Entstehung des mineralischen terrestrischen Staubes. Mineralischer Staub entsteht bei allen Prozessen, bei denen eine Reibung und Zerkleinerung der Gesteine stattfindet. So liefert Staub die trokkene Verwitterung, also die Insolation, die ein Zerspringen der Gesteine und einen Zerfall der Mineralien bewirkt, ferner der Spaltenfrost. Auf der Schneedecke am Fuß eines Felsenhangs kann man den abgesprengten Staub oft genug beobachten. Sodann entsteht bei der Korrosion und beim Transport von Gesteinsmaterial durch Wind und Wasser feines zerriebenes Material, das als Schlamm von Wasser abgesetzt, als Staub vom Wind ausgeblasen wird. Erliegen seine tonigen Ablagerungen später der Winderosion, so gelangen sie als Staub in die Atmosphäre.

Ein wichtiges Staubmaterial aber ist noch zu nennen, der Salzstaub, der sowohl an der Küste durch Zerstäuben des Wassers entstehen kann, als auch in abflußlosen Steppen und Wüsten. Dieser Salzstaub ist namentlich deshalb wichtig, weil er die Zersetzung der Gesteine befördern und damit der Winderosion Material liefern kann. In Steppen und Wüsten blüht das Salz aus, wird leicht vom Wind verweht, namentlich mit Hilfe des Sandschliffs, und beteiligt sich so an der Zusammensetzung des Staubes.

Transport. In der Art des Transports von Sand und Staub besteht ein grundlegender Gegensatz. Während der Sand am Boden entlang fliegt und rollt und nur der feine Sand hoch in die Lüfte gelangt, wird der Staub auch von schwachen Winden mit Leichtigkeit emporgehoben und hält sich lange Zeit hindurch schwebend. Die Struktur der Winde ist hierbei von großer Wichtigkeit. Einmal sind Windstöße geeigneter, Material loszureißen und hochzuheben als eine kontinuierliche Luftbewegung, sodann aber entstehen beim Anprall des Windes am Boden und an aufrechten Hindernissen Wirbel, die den Staub emporschleudern. Vielleicht noch wichtiger sind aber die Tromben, die mit gewaltiger Kraft pfeilschnell in drehender Bewegung Staub und selbst Sand empor-

wirbeln, hunderte von Metern hoch. Die aufsteigenden Luftströmungen — Konvektionsströmungen —, die sich an heißen Tagen entwickeln, tragen wohl ganz wesentlich dazu bei, das Herabsinken des Staubes zu verhindern, und bewirken, daß er lange schwebend bleibt. Ja, die aufsteigende heiße Luft scheint sogar imstande zu sein, bei Windstille vom Erdboden feinsten Staub emporzuheben. In sommerlichen Antizyklonen, in denen die Luft bekanntlich hinabsteigt, herrscht gewöhnlich dunstiges Wetter, der Horizont ist verschleiert, namentlich wenn das Hoch lange angehalten hat. Es könnten sehr wohl feinste Staubteilchen, die mit der Luft von oben hinabsinken, die Ursache der Trübung der Atmosphäre sein oder die heißen, in den untersten Luftschichten aufsteigenden Konvektionsströmungen führen Staub der Erdoberfläche mit sich. Sicher ist jedenfalls, daß Staub über die ganze Erde verbreitet werden kann und nur sehr langsam herabfällt. Selbstverständlich bestehen zwischen Sand und Staub hinsichtlich des Transports alle Uebergänge, vermittelt durch den feinen staubähnlichen Sand.

Zerstörungsformen. Infolge der Ablation und Korrasion durch den Wind werden Gesteine und lose Ablagerungen teilweise oder ganz abgetragen und daher zeigen sich in den Uebergangsstadien Zerstörungsformen, die oft recht charakteristisch sind und sich von gleichen Erscheinungen der Wassererosion unterscheiden.

Neben der Windstärke kommt es namentlich auf die Beschaffenheit der Gesteine an. Je mehr sie durch Insolation und Spaltenfrost in feines loses Material zerfallen, um so stärker wird die Windablation wirken, um so feiner werden die entstehenden Höhlungen, Grotten, Säulen, Gitter, Pilze usw. sein. Die Härte spielt namentlich dem Sandschliff gegenüber eine Rolle, je weicher ein Gestein im Verhältnis zum Quarzsand ist, der ja als Schleifmittel überwiegt, um so schneller wird es zerstört. Salze, Gipse, Lehme, Tone, Mergel verschwinden schnell, Kalksteine sind widerstandsfähiger, verkieselte Kalke, Quarzfelsen u. a. m. dagegen fast unverwüstlich. Die schwarzen bis braunen Schutzrinden, die überwiegend aus Mangan und Eisenverbindungen bestehen, sind sehr resistent, sie schützen das Gestein vor der Zerstörung durch äußere Kräfte. Allein hinter ihnen erfolgt doch eine energische Zersetzung durch die entstandenen oder primären Salze, so daß sich das Gestein in mürbes Pulver umwandelt. Wird dann die Schutzrinde an einer Stelle zerstört, so erfolgt eine rapide Winderosion hinter der schützenden Rinde, die nun schnell, ihres Haltes beraubt, abfallen muß. So wirken nach Burmester die „Schutzrinden“ eher die Abtragung befördernd als hindernd.

Für die Ausgestaltung der Zerstörungsformen ist ferner wichtig die Struktur des Gesteins. Ist es homogen, so entstehen glatte oder höchstens geriefte Flächen. Je feiner das Schleifmaterial ist, um so glätter und glänzender wird die Fläche. Ist dagegen die Struktur ungleichmäßig, wechseln harte und weiche Bestandteile ab, so richten sich die Zerstörungsformen nach der Struktur. Die weicheren Partien werden ausgehöhlt, die härteren als Erhöhungen herausgearbeitet. Geschichtete Gesteine erhalten so tiefe Schichtfugen, die überhängenden Fugen brechen schließlich nieder und so schreitet die Zerstörung vorwärts. Liegt eine harte Schicht auf weicherer, so können durch Zerstörung letzterer bei horizontaler Lagerung Pilzfelsen entstehen, die den bekannten Gletschertischen ähneln. Kalksteine, Sandsteine, kristalline Gesteine besitzen oft eine innere Struktur- und Härteverschiedenheit, die äußerlich nicht sichtbar ist. Der Sandschliff demonstriert sie uns drastisch durch Aushöhlen von Gräben, Löchern, Gängen wurmähnlicher Riefen, Galerien, großen Höhlungen, ganzen Labyrinthen; Pfeiler, Zapfen, Knoten, Leisten, Ringe, unregelmäßige Netzwerke und Gitter ragen dagegen als Erhebungen hervor. Wichtig ist der Umstand, daß dort, wo einmal ein Loch sich gebildet hat, dieses immer mehr erweitert wird, indem in der Höhlung befindlicher Sand und andere losgescheuerte Massen beim Vorüberstreichen des Windes in Drehung geraten, wie die Steine in einem Strudelloch, und so das Loch ausrunden und vertiefen. Besonders starke Winde räumen zeitweilig das entstandene Schleifpulver aus, das im Uebermaß sich anhäufend die Erosion zum Stillstand bringen würden.

Wenn Gerölle bei einseitig vorherrschendem Wind durch den Sandschliff bearbeitet werden, so wird die getroffene Seite angeschliffen und abgeflacht, die entgegengesetzte Seite aber durch den herabrieselnden Sand korradiert, wenn auch weniger. Eine scharfe Kante trennt beide Flächen. Die Schliffseite ist glatt und die berieselte meist mit Grübchen und wurmähnlich gewundenen Riefen bedeckt. Wehen von mehreren Seiten Winde aus bestimmten Richtungen, so können mehrere Schliffflächen entstehen. Neuerdings hat Cloß aus der Namib interessante Studien über diesen Gegenstand veröffentlicht.

Da Sand und Geröll hauptsächlich am Boden entlang schleifen, so erklärt es sich, daß dort, wo sich Berge aus Ebenen erheben, ihr Fuß am stärksten korradiert und die Schuttböschung zerstört wird. Steil aus der Ebene aufragende und selbst pilz-

förmig gestaltete Berge sind das Resultat. Bei abwechselnd harten und weichen Schichten entstehen Pilzfelsen, auch auf den Gehängen und Gipfeln der Berge.

Noch klarer tritt der Unterschied zwischen Wasser- und Winderosion in der Schaffung von Hohlformen hervor. Da der Wind in alle Ecken hinein, auf alle Höhen hinauf kann, so ist er imstande feines Material aus einer Gesteinsmasse herauszuholen und Vertiefungen zu bilden. Lokale Wirbel, die durch die Oberflächengestaltung als lokale Erhitzung — Tromben — gebildet werden, können erheblich dazu beitragen. So entstehen Windgruben vor Hindernissen, Windmulden in losem Sand, tiefe Furchen, Gänge, Höhlungen im Lehm — z. B. die Schardangs der zentralasiatischen Lehmwüsten. — Es sind das 6 m tiefe, 10 bis 40 m breite, oft parallele Furchen, die von schmalen Leisten und Rücken getrennt sind. Viel großartiger sind dagegen Pfannen und Kessel von einigen hundert Metern Durchmesser in festem Gestein und viele Kilometer lange Wälle aus aufgerichteten widerstandsfähigen Schichten, wie sie sich z. B. in den Gesteinsfeldern der Kalahari finden.

Auf die Bildung der Zeugen und Wadis und die sich an sie knüpfenden Probleme sei später eingegangen.

Staubschliff. Sehr viel bescheidener als die Wirkung des Sandschliffs ist die des Staubes. Er dient wohl wesentlich dazu die Felsen zu glätten und ihnen den eigentümlichen Glanz zu verleihen, der die Wüstengesteine oft auszeichnet. Indirekt trägt der salzhaltige Staub zu der Zersetzung des Gesteins bei, indem er sich in Spalten und Löcher festsetzt. Die Salze bereiten, zumal sie stark hygroskopisch sind, eine energische Verwitterung, Löcher, Höhlen, Galerien entstehen so, wie beim Sandschliff. Futterer hat solche Bildungen aus Zentralasien beschrieben, sie kommen aber auch anderswo vor.

Endformen der äolischen Abtragung. Wenn ein Gebiet ohne Unterbrechung vom Winde abgetragen wird, so müssen theoretisch schließlich alle Höhen verschwinden, mit Geröll bedeckte Ebenen — Hamadas — entstehen, die aber doch durch Sandwinde beständig, wenn auch sehr langsam zerkleinert werden. Das ideale Endstadium ist entweder eine bis zum Grundwasser erniedrigte Fläche — Salzpfanne — oder eine Gleichgewichtsfläche, von der die Winde nichts mehr abheben können, weil sie ohne Widerstand herüberstreichen oder weil sie sie mit den eigenen Ablagerungsprodukten — nämlich Sanden — bedeckten. Hamadas dagegen werden, wenn auch sehr langsam, abgetragen, solange die Gesteinsbrocken insolatorisch zerspringen und der Sandschliff wirkt.

Ablagerungsformen. Wenn der Wind abflaut oder in Gebiete kommt, wo die Hindernisse zu groß werden, so läßt er das transportierte Material fallen; er lagert es ab. Die Formen solcher äolischen Ablagerungen sind oft recht charakteristisch und nach dem Material verschieden.

Grobes Geröll. Von den Berggipfeln und Kämmen herabgeblasener Schutt bildet Schutthalden und Riesen, deren Form sich nach der des Gehänges richtet. In Wüsten aber entstehen die Geröllflächen — Hamada — durch Ausblasen des leichteren Materials. Das grobe Geröll solcher Hamdas wird nur bei starken Stürmen geschoben und gerollt und ist recht wenig beweglich. Es sind dies demnach, sozusagen, mehr „passive" Ablagerungen, d. h. sie sind liegengebliebene, Residuen der Winderosion, nicht aber aktiv durch den Wind abgelagerte Gebilde.

Sand. Viel wichtiger sind die Ablagerungen der Sande, und zwar sind sie von recht verschiedenartiger Form. Es kommt nämlich auf das Verhältnis von Windstärke, Sandkorngröße und Form des Widerstandes an. Ja es kann vorkommen, daß vor einem bestimmten Hindernis der eine Wind erodierend, der andere aber ablagernd wirkt. Zwei Arten von Formen hat man zu unterscheiden, im Aufbau begriffene, fertige und in Zerstörung begriffene.

Im Aufbau befindliche Formen. Weht der Wind an einem Hindernis seitlich vorbei, so bleibt der Sand in dem Windschatten in Form eines langen Schweifes, eines Sand- oder Dünenhakens liegen.

Weht der Wind Sand gegen ein schmales Hindernis, so entsteht hinter diesem ein Raum mit weniger bewegter Luft und dort kann sich der Sand anhäufen. Dieser bildet einen langen Schweif, den sogenannten Zungenhügel. Dieser ist gewissermaßen durch Vereinigung zweier Sandhaken entstanden. Ist das Hindernis eine im Sand wachsende Pflanze, so fangen deren Zweige den Sand ab und häufen ihn an. In einem Gebiet mit wechselnden Winden — also z. B. in vielen Wüsten — wird der Sand des Zungenhügels beständig verweht, der von der Pflanze abgefangene Sand aber ist festgelegt. So entstehen unter dem Einfluß der unter Sandverschüttung immer wieder emporwachsenden Pflanzen einzelne hohe Vegetationshügel. In Wüsten, z. B. Algeriens und Asiens, sind sie häufige Erscheinungen. Bogendünen entstehen im Anschluß an ein breiteres Hindernis, z. B. eine Hecke, oder noch häufiger durch Verschmelzung zahlreicher Zungen- und Vegetationshügel. Sie besitzen einen zum aufbauenden Wind querstreichenden Kamm, der auf der Luvseite eine konvexe Ausbuchtung, auf der Leeseite eine konkave Einbuchtung zeigt. Die Böschung der Luv-

seite ist flach, meist 5 bis 6°, selten bis 10°, die der Leeseite entspricht dagegen dem natürlichen Böschungswinkel von trockenem Sand, 30 bis 33°. Bogendünen, deren Seitenflügel beim Wandern sich soweit verschieben, daß sie einander parallel laufen, nennt man in Turkestan Barchane. Die Höhe der Barchane und Bogendünen ist meist gering, beträgt oft nur wenige Meter, selten bis 20 m.

Schließen sich Bogendünen zu langen Ketten aneinander, so nennt man sie nach Solger Walldünen. Keine andere Dünenform erreicht eine solche Höhe, wie diese, in Europa 50—70 m, in Wüsten bis 200 m. Sie können in zahllosen, mehr oder weniger parallelen Ketten angeordnet sein. Die Böschungswinkel sind die der Bogendünen. Walldünen en miniature sind die Wellenfurchen oder Sandwellen (= Ripplemarks). Wie im flachen Wasser bilden sich auf der Oberfläche des Sandes, über den der Wind hinstreicht, kleine, wellig verlaufende Systeme von Sandwellen, die im wesentlichen einander parallel verlaufen, sich aber auch häufig teilen und wiedervereinigen. Ihre Höhe schwankt zwischen 1—10 cm. Je gröber der Sand, um so höher sind sie und um so größer sind auch die Kammabstände der parallelen Wellen, und zwar ist der Abstand ziemlich genau zehnmal so groß als die Höhe. Mit dem Winde wandern die Wellen allmählich weiter.

Die Entstehung der Wellenfurchen ist von vielen behandelt worden, z. T. sogar experimentell, so z. B. von G. Darwin und Cornish, allein die beste Erklärung hat Helmholtz gegeben. Baschin gebührt das Verdienst, diese bei der Entstehung der Dünenformen angewandt zu haben. Wenn zwei in sich bewegliche Materien — also hier Luft und Sand — in verschiedener Dichte und Geschwindigkeit übereinander sich fortbewegen, dann wird die Grenzfläche wellig, weil eine Wellenfläche die Fläche geringster Reibung ist. Wie bei dem Chladnischen Versuch der Sand sich auf den Linien geringster Schwingung anhäuft, so häuft sich der Sand entlang der Linien geringster Bewegung an. Helmholtz hat die Gesetze der Entstehung solcher Wellen, ihrer Höhe und Abstände mathematisch berechnet. Es kommt auf die Geschwindigkeit, die Dichte der beiden Materien und auf die Dauer der Einwirkung an. Die Wellen werden nämlich immer höher, und zwar nicht durch Vergrößerung der zuerst entstandenen, sondern durch Bildung neuer Wellen höherer Ordnung.

An besondere, lokale Bedingungen gebundene Dünen sind die Stufendünen (Jentsch). Untere Stufendünen entstehen durch Anhäufung von Sand vor einem Hindernis, z. B. einem Kliff und sind von diesem durch einen Windgraben getrennt. Obere Stufendünen entstehen dagegen auf dem Rande einer Steilstufe, auf die von unten her Sand geblasen wird. In dem toten Winkel, der durch den am Gehänge hinaufgepreßten Wind nahe der Kante entsteht, fällt der Sand nieder und bildet eine Düne.

Zerstörungsformen. Die Dünen werden allmählich bewachsen — mindestens die feuchten Gebiete. Da die Bewachsung aber nicht gleichmäßig vor sich geht, so beginnt auf den noch unbewachsenen Stellen eine lebhafte Winderosion, die später näher geschildert werden soll. Hier seien nur die hauptsächlichsten Formen erwähnt. Windgräben sind längliche grabenförmige Vertiefungen. Sie entstehen einmal vor einem Hindernis, z. B. einem Stein; indem sich der Wind staut und unter Wirbelbildung seitlich ausweicht und den Sand vor jenem mitnimmt. Der andere Sand wird hinter dem Hindernis zur Bildung des Zungenhügels oder Sandhakens verwandt.

Windmulden entstehen im Anschluß an sandfreie Stellen, z. B. nach Verletzung der Vegetationsdecke. Der Wind beginnt die Wurzeln zu unterminieren, die Pflanzen sterben ab und werden verweht; die Mulde wächst in die Tiefe, Breite und namentlich mit der Windrichtung in die Länge. Allein mit der Entstehung treibenden Sandes beginnt die Ansiedlung bestimmter Sandpflanzen, die schließlich eine Bewachsung der Windmulde veranlassen.

Kupsten sind Vegetationshügel, aber nicht primäre, sondern sekundäre, durch Erosion entstanden. Aehnlich wie bei Erdpyramiden und Gletschertischen schützt eine widerstandsfähige Masse die leichter zerstörbare Unterlage, bis diese soweit unterwühlt ist, daß der schützende Gegenstand abstürzt. Solche Kupsten sind sehr häufige Erscheinungen in allen Flugsandgebieten.

Parabeldünen sind Bogendünen, deren Luvseite konkav ist im Gegensatz zu konvexen Bogendünen oder Barchanen. Sie entstehen auf verschiedene Weise, sind aber stets mit erheblichen Zerstörungen verbunden. Ihrer Entstehung nach kann man zwei Arten unterscheiden, die Haldendüne und die eigentliche Parabeldüne.

Die Haldendüne schließt sich an die Entstehung einer Windmulde oder eines Windgrabens an, der eine Walddüne durchsetzt. Der ausgeblasene Sand wird nämlich in konkavem Bogen angehäuft und gleichzeitig die Sande im Inneren des Bogens immer aufs neue erodiert und über das Mittelstück hinausgeworfen. Dieses wandert also weiter, während gleichzeitig die Seitenflügel immer länger werden. Durch Erosion werden die Innenseiten der Flügel steil und z. T. überhängend. Zerreißt das Mittelstück, so bleiben

die Seitenflügel allein übrig und bilden Strichdünen. In anderen Fällen löst sich das Mittelstück oder auch die Flügel in Kupsten auf, wenn sie nämlich nur teilweise mit Vegetation bedeckt werden.

Die eigentliche Parabeldüne ist eine bewachsene Wanderdüne, deren Enden durch Vegetation festgelegt worden sind. Das Mittelstück ist weiter gewandert und so ist ein konkaver Bogen wie bei der Haldendüne entstanden, deren inneres Becken gleichfalls durch Erosion vertieft und deren Innenseiten deshalb steilwandig aufragen. Auflösung in Kupsten ist nicht selten, sowie auch Vernichtung des Mittelstücks unter Entstehung von Strichdünen. Halden- und Parabeldünen sind einander nicht nur sehr ähnlich — meist sind letztere größer und liegen oft isoliert da — sondern gehen auch ineinander über, indem sich bei der lokalen Zerstörung der Parabeldünen auch Haldendünen bilden. Auch können unter günstigen Umständen Haldendünen zu wandern anfangen, indem sich das Mittelstück losreißt und abwandert, um schließlich als bewachsene Parabeldüne zu enden.

Das Wandern der Dünen. Art des Wanderns. Aehnlich den Ablagerungen eines noch tätigen Flusses sind die Sedimente des Windes in beständiger Umlagerung begriffen. Allein während der Flußsedimente in ganz unregelmäßiger Weise weiter geschoben werden, und auch der Staub leicht wieder auseinander geblasen wird, wandern die Sandablagerungen in gesetzmäßiger Weise weiter. In den kleinen Sandwellen kann man das Wandern leicht beobachten. Der Wind rollt die Körner den 5 bis 10° steilen Abhang der Luvseite hinauf und dann rollten sie passiv den Abhang hinab, falls sie nicht sofort weiter geblasen werden. Daher hat die Leeseite den Böschungswinkel lose aufgeschütteter Sande, nämlich 30 bis 33° Bei grobem oder feuchtem Sand kommen auch steilere Böschungen vor. Indem so Korn für Korn von der Luvseite auf die Leeseite geworfen wird, wandert die Sandwelle langsam vorwärts. Im Prinzip ist das Wandern der Barchane und der großen Walldünen das gleiche, nur langsamer entsprechend der größeren Höhe, der größeren Sandmenge und damit der größeren Arbeitsleistung. Die Geschwindigkeit wechselt also mit der Windstärke und der Sandmenge. Messungen der Geschwindigkeit sind wiederholt angestellt worden. Die Dünen der Kurischen Nehrung wandern nach Behrendt jährlich ca. 6 m, die der pommerschen Küste im Durchschnitt 9 m. Die Dünen der transkaspischen Wüste rücken nach J. Walther jährlich rund 6 m nach Süden. Allein an einem stürmischen Tag können einzelne Dünen bis zu 20 m wandern. Die wandernden Dünen sind entweder Barchane — und zwar ist der Barchan die typische Form für eine lokale wandernde Sandanhäufung — oder lange Walldünen; allein auch diese zeigen an den Enden Neigung zum Umbiegen.

Die Veränderung der Dünenformen. Die Dünen sind ihrer Form nach abhängig von dem Material und der Beschaffenheit des Windes. Aendert sich einer der beiden Faktoren, dann muß sich auch die Form ändern. Wenn sich auch Gröber- oder Feinerwerden des Korns, Zu- oder Abnahme des fliegenden Sandes und der Windstärke in dem Böschungswinkel und der Höhe bald bemerkbar machen, so sind solche Einflüsse doch weniger auffallend als die Aenderung der Windrichtung. Wirkt auf eine bei Westwind z. B. gebildete Walldüne ein Ostwind, so wird die frühere Leeseite zu Luvseite. Die Böschung wird abgeflacht, indem sich auf dem Kamm eine neue Düne mit Steilabfall nach Westen entwickelt und andererseits der untere Teil der Böschung, von Windstößen getroffen, unter Abrutschungen des Sandes die Böschungswinkel der Luvseite, 5 bis 10°, annimmt. Hält der Ostwind lange genug an, so erreicht die neue Leeböschung schließlich den Westrand der Düne und damit wäre die Umwandlung des Profils vollendet. Kommt dagegen der Westwind wieder zur Herrschaft, so erfolgt die Rückkehr zur alten Form. In Gebieten mit wechselnden Winden haben auch die Dünen sehr wechselnde Formen. Namentlich stören schräge auflaufende Winde — wenn z. B. Südwestwinde auf Nord-Süd streichende Walldünen stoßen — den regelmäßigen Verlauf. Denn die Südwestwinde werden in den Nord-Süd-streichenden Dünentälern abgelenkt und verursachen an an der Leeböschung Rutschungen, im Dünental aber werfen sie Querdünen auf. So entsteht zunächst ein Gitterwerk. Allmählich werden aber die Unterschiede zwischen Lee- und Luvböschung verwischt. Sodann aber verwandelt sich auch der Kamm in ein System querstreichender Wellen. Bleibt also der Südwest konstant, so wäre schließlich ein System NW—SO-streichender Dünenkämme und Dünentäler das Endresultat.

Die Umwandlung kleiner Barchane, die bei Nordwestwind gebildet worden waren und dann durch einen Südwind angegriffen wurden, hat Baschin auf Fanö studiert. Es wuchsen aus dem Hauptkörper der Bogendünen auf ihrer Nordseite kleine Fortsätze heraus, die immer größer wurden, während gleichzeitig die primären Seitenflügel der Südseite verschwanden und die Böschungen des Körpers sich umwandelten. Hätte nicht eine Sturmflut alles zerstört, so wären schließlich nach Norden gerichtete Barchane entstanden.

Neben der Aenderung der Windrichtung spielen Hindernisse oft eine Rolle bei der Umgestaltung einer Düne, namentlich auf der Leeseite der Hauptwindrichtung. Läuft z. B. eine Walldüne gegen ein isoliertes Hindernis, über das sie seitlich hinausragt, so entstehen vor dem Hindernis Wirbel und Stauungen, die eine Windmulde oder einen Windgraben veranlassen können. Auch wandert die Düne vor dem Hindernis langsamer; sie verändert ihre Form. Solche Hindernisse können Häuser, Wälder, Hügel u. a. m. sein. Wehen umgekehrt Winde aus der Richtung des Hindernisses, so schützt dieses die Düne vor Erosion und verlangsamt ein Rückwandern. Damit kann ein gewisser Ausgleich bezüglich des Fortschreitens der Düne herbeigeführt werden. In jedem Fall aber wird die dem Hindernis gegenüberliegende Dünenseite in der Form beeinflußt und zwar durch Bildung von Windmulden, schmalen Haken und breiten Vorsprüngen.

Innere Struktur der Dünen. Schichtung hängt vom Wechsel des Materials ab. Sie ist um so deutlicher, je größer der Unterschied zwischen den Korngrößen der verschiedenen Ablagerungen ist. Bei Dünen fehlt eine Schichtung, wenn der Sand gleichmäßig körnig ist. Allein meist stehen den Winden Sande von verschiedener Korngröße zur Verfügung, und da die verschieden starken Winde verschieden große Sandkörner transportieren und ablagern, so entstehen innerhalb der Dünen Lagen verschiedener Korngröße und damit Schichten. Je größer eine Düne ist und je längere Zeit zu ihrer Entstehung notwendig war, je verschiedenartiger also die Stärke der aufbauenden Winde war, um so leichter wird Schichtung entstehen können. Außerdem wird es von Wichtigkeit sein, ob der Dünensand schon weit gewandert ist und damit eine gründliche Saigerung stattgefunden hat. Je näher die Düne der Gegend liegt, die Flugsand von verschiedener Korngröße geliefert hat und je weniger sie hin- und hergeschoben worden ist, um so deutlichere Schichtung ist zu erwarten. Demgemäß haben die kleinen Sandwellen und die kleinen Barchane, die ein Sturm schnell aufwirft, wohl nie Schichtung, wohl aber die großen Walldünen. Nach Middendorf kann Schichtung auch dadurch entstehen, daß sich beim Abflauen des Windes Staub auf den Dünen absetzt. Wird dieser durch Tau oder Salze verkittet, so wird er bei Erneuerung des Windes auf der geschützten Leeseite nicht vom Sandschliff zerstört, sondern vom Sand bedeckt und erhalten.

Stehende Dünen haben eine dachförmige, der Luv- und Leeseite parallele Schichtung In Wanderdünen dagegen erliegen die älteren Dünen teils der Winderosion und deshalb besteht die Düne, wenn der Fuß der Luvseite die senkrecht unter der ursprünglichen Kammlinie angekommen ist, theoretisch nur noch aus Schichten, die dem Leeböschungswinkel parallel sind. Allein infolge von Rutschungen und Störungen des Profils beim Spiel wechselnder Winde sind recht wechselnde Schichtungen zu erwarten. In noch viel höherem Grade trifft das für Gebiete zu, die Zerstörungen und Neubildungen in Form von Windgräben, Windmulden, Halden- und Parabeldünen ausgesetzt sind. So kommt die bekannte Kreuzschichtung oder transversale Parallelstruktur zustande, die nach J. Walther gerade für Dünen charakteristisch sein soll, sich aber auch in Flußbetten mit wirbelnder, stark wechselnder Strömung bilden.

Staubablagerungen. Viel einfacher als beim Sande sind die Ablagerungsformen des Staubes, ja man kann sagen, daß eigentlich überhaupt keine charakteristischen Formen wie es die Dünen sind, vorkommen.

Ablagerungsbedingungen. Da selbst mäßiger Wind feinen Staub leicht hinwegtragen, und aufsteigende Wirbel so allgemein verbreitete Erscheinungen sind, müssen besondere Bedingungen eintreten, um den Staubabsatz zu ermöglichen. Als erste Vorbedingung ist zu nennen ruhige Luft. Indessen fällt der Staub, mindestens der feinste, nur sehr langsam aus. Schwebte doch die feine Asche des Krakatau jahrelang in der Luft. Sodann kann Staubabsatz hinter einem Hindernis stattfinden, auch bei Wind, z. B. in Häusern, wo man den Staub in manchen Gegenden als Plage empfindet, in Höhlen und Felsspalten, im Windschatten von Höhenzügen und Felsen. Noch wichtiger ist das Abfangen des Staubes durch die Vegetation. Wälder, Gebüsch und Heidekraut, Wiesenrasen und selbst die Büschel des Steppengrases halten den Staub fest, weil sich zwischen den Zweigen ruhende Luft befindet. Auch wirkt das Gewirr und Netzwerk der Blätter und Zweige direkt als Filter. Eine andere Gelegenheit für Staubabsatz bilden Wasserflächen und feuchter Boden. Der Tau kann also bedeutungsvoll werden, besonders auch dadurch, daß er die Staubteilchen zusammenklebt. Sümpfe mit Schilf oder Rasen sind gute Staubfänger, desgleichen feuchte Salztone.

Noch wirksamer sind die die Luft passieren den Niederschläge, also Regen und Schnee. Auch der nasse Nebel ist wirksam, weil er die Staubteile schwer macht und beim Fallen mitnimmt.

Ablagerungsformen. Für den Staub ist es besonders charakteristisch, daß er noch viel weiter und höher gelangen kann als der Sand. Unabhängigkeit von einem bestimmten Niveau ist also die Folge. So entstehen denn an geschützten Stellen Staub-

ablagerungen, deren Form indes lediglich von der Lokalität abhängt. Am wichtigsten ist die Staubablagerung in Ebenen und Becken, durch die weite gleichförmige Flächen entstehen, so z. B. die Lößbecken Chinas. Bestimmte Formen, ähnlich den Dünenformen gibt es nicht. Höchstens wäre die Bildung von Ebenen in Steppenniederungen und -becken zu nennen.

3. Die regionale Verbreitung der durch Winde bedingten geologischen Erscheinungen. Die Bedingungen für die geologische Arbeit des Windes sind in den verschiedenen Teilen der Erde sehr verschiedenartig, indem bald dieses, bald jenes Hindernis sich einstellt und bei dem Zusammenwirken der verschiedenen Faktoren kommen regional ganz besondere Erscheinungen zustande, die man zweckmäßigerweise als einheitliches Ganzes betrachtet.

3a) Polarregionen. Allgemeine Bedingungen. Günstig wirkt der Mangel an Vegetation, sodann aber die austrocknende Wirkung der Luft. Zwar ist wegen der niedrigen Temperatur die relative Feuchtigkeit sehr hoch, allein die absolute ist minimal und deshalb entzieht die Luft mit Energie allen Gegenständen ihre Feuchtigkeit. Zigarren z. B. zerfallen daher in feinen Staub; auch der Erdboden muß, namentlich unter dem Einfluß der Winde schnell austrocknen und staubig werden. Die Stärke der Stürme ist der dritte, die Windarbeit befördernde Faktor. Viertens wirkt der Spaltenfrost äußerst energisch ein. Die von der tiefstehenden Sonne beschienenen Felsen erwärmen sich, das im Gestein enthaltene Wasser taut auf, gefriert aber, sobald die Schattenperiode beginnt. Daher entfaltet der Spaltenfrost eine sehr energische Tätigkeit und das Gestein zerfällt zu Schutt und Staub. Schnee und Eisbrocken können schließlich auch als Schleifmaterial dienen. Ungünstig wirkt die Schneedecke während des ganzen Herbstes, Winters und Frühjahrs und im Sommer die Schmelzwasser, die den Boden durchtränken. Auch ist der Mangel an wühlenden Tieren und Huftieren erwähnenswert. Wo Moos- und Flechtenpolster den Boden bedecken, sind die Bedingungen besonders ungünstig, also z. B. in den weiten Tundren.

Winderosion. Die zerstörende Tätigkeit des Windes besteht im wesentlichen in der Loslösung des Staubes und feinen Schutts, den der Spaltenfrost auf dem Felsen gebildet hat. Auch sind runde Löcher und Höhlungen, sowie strudeltopfähnliche Kessel, z. B. in Tuffen Islands, auf Winderosion zurückzuführen. Im allgemeinen ist die Wirkung jedenfalls gering, die ungünstigen Einflüsse überwiegen.

3b) Feuchte Regionen. Darunter seien alle Gegenden verstanden, deren Niederschlagsmenge genügt, um eine Wald-, Busch-, Kraut- und Wiesendecke zu erzeugen, also die ganze gemäßigte Zone mir ihren Wäldern und Wiesen sowie die regenreichen Teile der Subtropen und Tropen. Allein wenn irgendwo, hat die Kultur in diesen Regionen umgestaltend gewirkt und zwar durch Entwaldung und Anlage von Feldern. Auch für die Arbeit des Windes ist das von Bedeutung.

Die Bedingungen der Winderosion sind durchaus ungünstig, namentlich in unberührten Naturgebieten. Vegetationsdecke und Feuchtigkeit hindern die Winderosion und in der gemäßigten Zone kommt dazu die Schneedecke. Diese wirkt namentlich auch in und nach der Schmelzperiode durch Einweichen des Bodens. Wichtig wird die Windarbeit erst auf den Gipfeln der Hochgebirge, die über die Grenze des Krummholzes und der Matten ragen. Den durch Spaltenfrost entstandenen Schutt blasen Stürme und Orkane hinab. Etwas günstiger sind die Bedingungen im Kulturland, namentlich in der gemäßigten und subtropischen Zone. Die im Frühjahr und Herbst, bezw. im Hochsommer kahlen Felder sind dem Winde preisgegeben. Allein nur nach starker Austrocknung ist genug Staub vorhanden, gewöhnlich treten Nässe und Schnee dem Winde feindlich entgegen. Trotzdem ist die Verteilung des Staubes durch Winde nach Free für die Landwirtschaft von großer Wichtigkeit, weil durch ihn ein Ersatz der von den Pflanzen verbrauchten Nährstoffe stattfindet. Zu Sandtreiben kann es auf sterilem vegetationsarmen Sandboden leicht kommen, zumal dann, wenn der Sand fossilen Dünen angehört. Starke Stürme richten auf Feldern in Nordamerika durch Ausblasen des Bodens oft großen Schaden an.

Auf trockenen Wiesen und Feldrainen spielen die Bodentiere, bei uns z. B. Maulwürfe, Mäuse, Ameisen u. a. m. eine gewisse Rolle, indem sie feinerdiges Material auf der Oberfläche aufhäufen, das ausgetrocknet vom Wind verweht werden kann.

Wie groß der Effekt der Winderosion ist, entzieht sich ganz der Beurteilung. An das Staubtreiben auf Wegen darf man sich nicht halten, dort schaffen Räder und Fußtritte abnorme Verhältnisse, so daß an günstigen Stellen bekanntlich Hohlwege entstehen können. Da der Wind auf Feldern flächenhaft wirkt und eine Abtragung von rund 1 cm eine ganz bedeutende Bewegung vom Material voraussetzt — 10 cbm pro qkm — so ist es verständlich, daß die Windwirkung weniger klar in Erscheinung tritt, als bei einem lokalen Wasserriß. Der abgetragene Staub wird übrigens sehr bald wieder von der Vegetation abgefangen oder durch Niederschläge

herabgebracht. Die feuchten Gebiete sind jedenfalls mehr eine Region der Staubablagerung als der Winderosion. Allein auch in jenen gibt es Stellen, wo der Wind eine bedeutende Tätigkeit entfaltet, nämlich die Küsten.

Küstendünen. An manchen Küsten der feuchten Regionen entstehen Dünen, die sogar sehr erhebliche Höhen erreichen. Indessen müssen zu ihrer Entstehung gewisse Bedingungen vorhanden sein. Dazu gehört einmal ein Vorherrschen des Seewindes, denn dieser allein kann den Sand auf den Strand treiben. Sodann müssen trockene Perioden mit Seewinden den von der See ausgeworfenen Sand trocknen. Drittens muß genügend Sand auf den Strandwall aufgeworfen werden und der Strand eine genügende Breite besitzen. Flachland ist für die Entwickelung von Dünen günstiger als eine Kliffküste. Schließlich ist es günstig, wenn die Richtung der Küste möglichst senkrecht zur Hauptwindrichtung verläuft. Wichtig ist vor allem auch das Vorhandensein eines linienförmigen Strandes, von dem aus der Wind gleichmäßig den Sand in das Innere bläst. Die wichtigsten Formen der Küstendünen sind folgende. Der Strandwall ist der Sandlieferant und auf ihn folgt eine Fläche aus trockenem Sand, wo das Sandtreiben beginnt, die Abblasefläche. Der Beginn der Anhäufung des Sandes ist auf das engste an das Auftreten der Vegetation geknüpft. Die Bedeutung dieser für die Dünenbildung ist längst bekannt, allein in allen Einzelheiten haben sie erst Cowles am Michigansee und Reinke an der Nordsee studiert. Entscheidend nämlich wird das Auftreten derjenigen Pflanzen, die gerade im fliegenden Sande ihre besten Wachstumsbedingungen finden, indem sie, von Sand überschüttet, neue Wurzeln und Halme treiben. Bei uns ist es der Strandweizen (Triticum junceum), dessen Samen obendrein auf nassem salzhaltigem Boden zuerst festen Fuß fassen. Seine Halme halten den Sand fest und treiben sofort neue Wurzeln. So entsteht ein immer größerer Sandhaufen, ein Vegetationshügel, hinter dem sich ein Zungenhügel entwickelt. Stehen viele Triticumbüsche zerstreut nebeneinander, so verschmelzen die Sandhaufen und bilden den Beginn von Walldünen. Da nun der Strandweizen an einen gewissen Salzgehalt gebunden ist, der Sand der jungen Düne aber vom Regen ausgewaschen wird und jener obendrein ins Innere wandert und salzigen Untergrund verläßt, so werden die Lebensbedingungen für den Strandweizen ungünstig und es siedelt sich auf der Düne der Helm- oder Strandhafer an (Calamogrostis oder Psamma arenaria), das ist die wichtigste aller unserer Dünenpflanzen, die zur Befestigung des Flugsandes am meisten beiträgt. Denn sie gedeiht auch gerade im fliegenden Sande. So verwandelt sich die „Triticumdüne“ in eine „Psammadüne“. Mag auch eine Sturmflut den Strand weithin überfluten und abwaschen, die junge Düne ist schon aus seinem Bereich gewandert und kann sich weiter entwickeln, während auf dem abgewaschenen Strand die Neubildung mit Hilfe des Strandweizens aufs neue beginnt. So entsteht also parallel dem Strande eine Walldüne — die sogenannte Urdüne oder Vordüne — oder Stranddüne durch Verschmelzung von Vegetationshügeln, Zungenhügeln und wohl auch Sicheldünen. Sie wandert langsam in das Innere. Gegenwinde verändern oft ihre Form. Hindernisse bewirken eine unregelmäßige Ausbildung der Leeseite. Das weitere Schicksal der Düne hängt von mancherlei klimatischen und lokalen Umständen ab. In unserem regenreichen Klima überzieht sich eine Düne, je älter sie wird und je mehr sie sich von dem Meer entfernt, immer mehr mit einer Vegetationsdecke, nämlich mit Heidekraut. Die „Grasdüne“ verwandelt sich in die Heidedüne, die sich ihrerseits mit Gebüsch und Wald bedecken kann. Diese Bewachsung geht aber unregelmäßig vor sich, so daß an kahlbleibenden Stellen Windmulden und daran anschließend Haldendünen entstehen. Schließlich wird doch alles mit Heide und Gebüsch überzogen. Ein sehr unruhiges Gelände aus Kuppen, Rücken, Löchern, Furchen bildet den Abschluß der Entwickelung. Es ist dies die Kupstenregion.

Ist der Strandwall gleichzeitig eine Nehrung, so wird der Sand in das Haff fliegen und dieses zuschütten helfen. So kann sich die Düne langsam gegen den See vorschieben, falls nicht Bewachsung ihr Einhalt gebietet.

Bei negativer Strandverschiebung und einer Flachsee mit sandigem Boden wird der Strand verbreitert, damit muß sich die Vegetation nach dem Meere hin verschieben, der Dünengürtel wächst also in die Breite, aber kaum in die Höhe.

Bei positiver Strandverschiebung ist die Entwickelung eine ganz andere. Das Meer zerstört die bereits vorhandenen äolischen Ablagerungen, eine Dünenkliffküste mit Entblößung loser Sandmassen entsteht und damit entwickelt sich eine energische Winderosion und -ablagerung. Neue Dünen werden aufgetürmt, indem die Vegetation als Hindernis wirkt. Mag auch diese im Kampf mit Düne zweitweilig siegreich sein, die Meereserosion liefert immer neue Sandmassen, die ins Inland wandern und so rücken die Dünen unbarmherzig weiter vor, solange das Meer vorrückt und dabei durch Zerstörung

des Ufers Sand geliefert wird, den der Wind landeinwärts wehen kann.

Wiederum anders ist der Verlauf bei Stillstand der Uferlinie. Dünensande häufen sich auf und bilden die Stranddüne. Entweder wird diese bewachsen unter Ausbildung von Windmulden, Kupsten und Haldendünen, oder sie wandert ganz oder streckenweise ins Innere bis auch sie in Form von Parabeldünen erstarrt.

Inzwischen liefert aber die Küste neuen Sand und dieser wird gegen die Stranddüne getrieben. Sie muß wachsen bis auf ihrem Gipfel Winderosion und -ablagerung im Gleichgewicht stehen. Es folgt dann ein Stillstand, die den Kamm der Stranddüne überfliegenden Sandkörner werden wieder landeinwarts in bewachsenem Gelände abgelagert. Die Stranddüne wächst also allmählich in die Breite und zwar landeinwärts durch langsame Ablagerung von Sand zwischen dem Heidekraut, Büschen und Bäumen. Gleichzeitig erhöht sie sich unaufhörlich. So können allmählich breite, hohe Rücken und Flächen aus Dünensanden entstehen, die im Kampf zwischen Winderosion und Vegetation die Form einer Kupstenlandschaft annimmt.

Die Wanderdünen unserer Küsten. Die riesigen 50 bis 60 m hohen Wanderdünen der Gascogne und der Kurischen Nehrung sind keine natürlichen Gebilde, sondern infolge der Zerstörung der Vegetationsdecke durch den Menschen entstanden. Alle aufgehäuften Dünensande sind dadurch aufs neue in Bewegung geraten und an dem Widerstand der noch vorhandenen Vegetation sich stauend, sind die hohen und langen Dünenwälle aufgeschüttet worden. Wo einzelne Dünen allein vorwärtsrücken konnten, ohne sich mit den Nachbarn zu vereinigen, entstanden konkave Sicheldünen, Barchane, z. B. der Schwarze Berg bei Rossitten. In dem sehr breiten, alten Dünenfeld der Gascogne sind mehrere Dünenzüge hintereinander gebildet worden. Bei ungehindertem Verlauf wird ein neues Dünenfeld mit überwachsenen Parabeldünen, Kupsten, Windmulden entstehen, wie es früher bestand und nach Braun sich auch noch in Resten auf der Kurischen Nehrung nachweisen läßt. Die Veränderungen in festliegenden Dünen — Bildung von Bleichsand, Ortstein u. a. m. — haben mit der Atmosphäre nichts mehr zu tun, müssen daher hier unberücksichtigt bleiben.

3c) Steppengebiete. Unter diesem Namen seien alle diejenigen Gebiete zusammengefaßt, die durch eine lange Trockenperiode ausgezeichnet sind, in der die Vegetation ruht und viele, ja zuweilen die meisten Pflanzen verschwunden sind. Der Boden ist dauernd oder auch nur in der Trockenzeit entblößt, indem die ausdauernden Pflanzen — Bäume, Sträucher, Stauden, Grasbüschel — in wechselnden Abständen voneinander stehen. Mit der Annäherung an die Wüste erfolgt der Uebergang in der Weise, daß die Lücken zwischen den Pflanzen immer größer werden und schließlich ganz verschwinden können. Steppengebiet in diesem Sinne sind die tropischen Baum- und Grasländer mit annähernd halbjähriger Trockenheit, die subtropischen Steppen mit Winterregen und heißen regenarmen Sommern sowie die Salzsteppen in Uebergangsgebieten zwischen Steppen und Wüsten.

Die Bedingungen für die Winderosion sind in Steppen wesentlich günstiger als in feuchten Gebieten. Die lange heiße Trockenzeit trocknet den Boden aus. Dieser Vorgang hat namentlich in chemischer Hinsicht eine ungemein wichtige Folge, indem sich nämlich die Kolloide des Bodens in Gele verwandeln. Hierüber orientiert am besten Raman's Bodenkunde. Damit geht die Fähigkeit, bei Durchfeuchtung zu backen und Klumpen zu bilden, verloren. Die bekannte „feinsandige" Beschaffenheit der Steppenböden hängt damit zusammen. Ebensowenig, wie es an feinem Material fehlt, mangelt es an Winden. Man denke an die Passate der tropischen Steppen. Manche subtropischen Gebiete haben im allgemeinen freilich schwache unregelmäßige Winde, allein sind doch stärkere Stürme dort keine Seltenheit, vor allem aber sind es die zahllosen Tromben an heißen Sommertagen, die über die Ebenen fegen und Staubmassen in bedeutende Höhen emporwirbeln. Sie wirken viel stärker als kräftige, horizontale Winde. Die gehobenen Staubmassen können weithin verfrachtet werden. Günstig wirkt in den Subtropen ferner der Umstand, daß die Niederschläge gerade in die kühle Jahreszeit fallen und auch in den Tropen ist die Zeit vor dem Regen stets die heißeste. Hitze, Trockenheit und Minimum der Vegetation wirken also zusammen und auch die Ausbildung der heftigen Passate fällt in tropischen Steppen in die regenlose Zeit. Wichtig werden die Niederschläge auch dadurch, daß sie aus benachbarten Wüsten eingeführten Staub niederschlagen und damit zur Bildung feinen Staubbodens Veranlassung geben. Der Wechsel von Niederschlag und Insolation in der Regenzeit hat chemische Vorgänge zur Folge, die für die Winderosion wichtig sind, und zwar in negativem Sinn. Die früher geschilderten Ausblühungen, die „Rinde" und die Kalkkrusten, sind es, die die oberflächlichsten Bodenschichten inkrustieren und damit der Winderosion entziehen können. Auch in den Salzsteppen spielen die Kalk- und Gipskrusten eine große Rolle; in der eigentlichen

Wüste treten sie zurück. In den Salzpfannen, die sich ja in Salzsteppen oft in großer Zahl finden, verkittet ausblühendes Salz den Boden beim Austrocknen. Allein gerade dort entfaltet auf der vegetationslosen Fläche der Wind seine volle Kraft und die Korrasion der Sandkörner kann sehr energisch wirken.

Das periodische Eintreten der Regen- und Trockenzeit hat zur Folge, daß die Flüsse einen stark wechselnden Wasserstand von oft 10 und mehr Metern besitzen. Infolgedessen ist ihr Bett während eines großen Teiles des Jahres trocken und die vegetationslose Fläche ein Spielplatz der Winde. Je trockener das Klima ist, je länger der Wind wirken kann und je spärlicher die Vegetation ist, um so bedeutender wird seine Wirkung sein.

Die Vegetation tritt dem Wind nicht so hinderlich in den Weg wie in feuchten Gebieten, immerhin hemmen Gebüsch und Steppenwald seine Arbeit oft gänzlich. Fliegender Sand kann sich gewöhnlich nicht bilden und Staubmassen werden festgehalten. Allein ist günstig wiederum die zerstreute Stellung der Büsche und Gräser und die geringe Beschattung des Bodens gerade während der heißesten trockensten Zeit. Auch hemmen niedrige Gras- und Zwergstrauchsteppen wenig die Kraft der Tromben.

In keiner anderen Region erreicht die geologische Tätigkeit des Windes mit Unterstützung der Tierwelt einen solchen Grad, wie in den Steppen. Denn dort leben infolge reichlicher Nahrung und des Vorhandenseins leichtlöslicher, zum Aufbau des Knochengerüstes notwendiger Salze die großen Herden von Säugetieren und auch für Bodentiere sind die Bedingungen günstig. Die Tätigkeit des Menschen ist verschieden zu beurteilen. Fördert er einerseits durch Abbrennen der Gräser die Windarbeit, so hindert er sie andererseits durch Vernichtung des Wildes in empfindlicher Weise. Erst die Einführung großer Rinderherden kann hier kompensierend eingreifen.

Gebilde der Winderosion. Charakteristisch für die Steppen ist das Zurücktreten der Sandkorrasion gegenüber der Staubausfuhr unter dem Einfluß der tretenden und wühlenden Tiere. Leider sind in jenen Zeiten, als noch die großen Herden in den Steppen Afrikas und Nordamerikas lebten, direkte Beobachtungen über die Wirkung der Tierhufe nur spärlich überliefert worden, einige positive Angaben liegen aber doch vor. Auch kann man rein deduktiv die Wirkung folgern.

Flächenhafte Abtragung durch Staubausfuhr findet vielleicht in großem Umfang statt, und zwar namentlich durch die kraftvollen Tromben, die den Staub hoch emporwirbeln und entführen. Die Fußtritte der Herden zerstören die „Rinde" und die Auswürflinge der Bodentiere, daß aber auch mürbe und selbst kristalline Gesteine durch die Tierhufe in eine dicke Staubschicht umgewandelt werden, hat Pechuel-Lösche in Damaraland direkt beobachtet. Wo die Herden der Herrero weideten, bedeckte eine tiefe Staubschicht alles Land, verhinderte die Wassererosion, bot dem Wind aber reichlich Material. Wenn man sich in die früheren Zeiten zurückversetzt, als der Mensch noch nicht existierte, als die großen Säuger oder noch früher die Saurier, deren Körpergewicht und Fußbreite um so vieles die unserer Rinder übertraf, ungestört die Steppen abweideten, so muß man sagen, daß die Begünstigung der Winderosion durch die Tierherden und die Einebnung des Bodens damals viel viel größer gewesen sein muß und von entscheidender Einwirkung auf die Oberflächengestaltung der damaligen Steppenländer gewesen sein könnte.

Lokale Winderosion. An Stellen, wo sich das Wild aus bestimmten Gründen zusammendrängt, z. B. an Wasserplätzen, die in flachen Vertiefungen liegen, an Salzlecken oder an Stellen mit reichlicher Nahrung, wie es z. B. trocken gelegte Alluvialflächen sind, ist die Wirkung der zoogenen Winderosion ganz besonders kräftig und deutlich. Dort entwickeln sich lokale Vertiefungen, Schalen, Pfannen und selbst Becken von vielen Kilometern Durchmesser. Die Längsachse der Pfannen läuft der Hauptwindrichtung parallel und auf der Leeseite sind oft Dünen aufgehäuft. Der Staub ist aber entfernt, der Sand ist zurückgeblieben. Solche durch zoogene Winderosion geschaffene Pfannen sind in Südafrika, aber auch in den Prärien von Nordamerika verbreitet. Die Tonpfannen Australiens — clay pans — mögen z. T. ähnlicher Entstehung sein, ebenso wie flache Schalen in den Steppen und Wüstensteppen Algeriens, wo die Herden längst ausgerottet sind. Sie können, was Moritz im Namaland beobachtet hat, von tierischen Rollplätzen oder von Stellen ausgehen, wo salzhaltiger Boden, z. B. Kalktuffe, oder wo mürbe, durch Insolation leicht zerfallende Gesteine anstehen. Hat sich an solchen Stellen einmal eine flache Vertiefung gebildet, in der Wasser stehen bleibt, das den Boden aufweicht und zersetzt, wo beim Auftrocknen die leicht zerstörbaren Schlammschalen entstehen und Salze sich anreicheren, so sind alle Aussichten vorhanden, daß eine Pfanne entsteht.

Gegenüber diesen Gebilden treten Löcher und Höhlen in Felsen, die unter der zersetzenden Wirkung von salzhaltigem Lößstaub entstehen und vom Winde ausgeblasen werden, zurück.

Aeolische Ablagerungen in Steppen. Viel wichtiger als die Erosionsformen

sind die der äolischen Ablagerung und zwar sind es namentlich zwei Formen, die bedeutungsvoll sind, die Flußdünen und die Staubablagerungen.

Flußdünen. Vorbedingung für die Entstehung von Flußdünen ist das Vorhandensein von breiten, flachen, sandigen Flußbetten mit wechselndem Wasserstand in Regen- und Trockenzeit. Steppenflüsse erfüllen im Flachland diese Bedingung häufig in hohem Grade, so z. B. in Südrußland. In dem periodisch überfluteten, mit rollendem Sand erfüllten Flußbett kann die Vegetation nicht festen Fuß fassen und daher jagt der Wind in der Trockenzeit den Sand über die kahlen Flächen ins bewachsene Land hinein. So entstehen Dünen, die mit denen der Küsten den linearen Ausgang gemeinsam haben und diesen daher in vielen Punkten ähneln. In der Trockenzeit fliegt der Sand, in der Regenzeit dringt die Vegetation vor. Bestimmte Sandpflanzen spielen, wie an den Küsten, bei der Anhäufung und Befestigung die Hauptrolle. Die Höhe der Flußdünen ist im allgemeinen geringer als an Küsten; nämlich 10 bis 15 m, indes sind sie in Andalusien 25 m, in Südrußland 30 m hoch. Auch Ungarn, namentlich das Banat, hat ausgedehnte Flußdünenfelder.

In Turkestan stammt nach Walther der Sand der großen Wüsten von Flußsanden ab, nach Solger dagegen ist die Beteiligung der Flußsanddünen gering. Die Formen dieser sind noch wenig studiert, dürften aber von denen der Küstendünen wenig abweichen. Die Frage ist insofern wichtig, als in Norddeutschland zahlreiche fossile Dünen in den Urstromtälern entstanden sind und man aus ihrer Form auf die Windrichtung der Diluvialzeit geschlossen hat. Solger nimmt Ostwinde an, weil nach Westen offene Sicheldünen vorliegen, die aber durch Südwestwinde vor ihrer Bewachsung gewisse Umänderungen der Böschungswinkel erlitten haben.

Staubablagerungen. Die Bedingungen für Staubablagerungen sind in Steppen günstig, denn einmal sind Staubwinde aus benachbarten Wüsten häufig, sodann kann die Vegetation als Filter wirken, dazu kommt in den Subtropen das Ueberwiegen hohen Luftdruckes mit absteigender Luft und schwachen Winden. Vor allem aber ist das Einsetzen der Niederschläge wichtig, die den Staub ausfällen. Man kann verschiedene Arten der Steppenböden unterscheiden:

Rote, staubige bis feinsandige Böden sind in den heißen Subtropen weit verbreitet. Das Material ist z. T. von benachbarten Bergen herabgeschwemmt worden, z. T. von Staubwinden aus Wüsten und Wüstensteppen herbeigeschafft worden. Kalkkrusten liegen häufig in $^1/_4$ bis 1 Fuß Tiefe unter der staubigen Aufschüttung. Neben direktem äolischen Absatz ist das flächenhaft abfließende Regenwasser bei ihrer Ablagerung in den Ebenen und auf flachen Gehängen stark beteiligt. In der südafrikanischen Karru, in den algerischen und kleinasiatischen Hochsteppen, in den subtropischen Teilen des Felsengebirges sind solche rötliche Staubböden verbreitet.

Der Löß. Weitaus die wichtigste Art der Staubablagerungen ist aber der Löß, eine gelbe bis gelbbraune, ungeschichtete bis geschichtete, von verzweigten kapillaren Röhrchen, die oft mit Kalk inkrustiert sind, durchsetzte feinerdige poröse, zerreibliche Erde, die namentlich in China verbreitet ist und dort einige hundert Meter Mächtigkeit erreichen kann. Mergelkonkretionen — die sogenannten Lößmännchen — sind häufig und können ganze Horizonte erfüllen. Reste von Steppenschnecken und Steppensäugetieren sind nicht selten eingeschlossen. In China erfüllt er Becken zwischen Gebirgszügen und Landschwellen. Häufig liegen Salzseen in tiefsten Stellen der Lößbecken. Der chinesische Löß ist auf verschiedene Weise entstanden. Z. T. ist er sicher eine Wasserablagerung in Seebecken und dann geschichtet, fester, ohne kapillare Struktur, enthält oft Wasserschnekken und kommt als nichtäolisches Gebilde hier nicht in Betracht. Bezüglich des echten äolischen Lößes kann kein Zweifel darüber bestehen, daß sein Material aus den zentralasiatischen Wüsten stammt, und aus der Zerstörung verschiedener, namentlich diluvialer Ablagerungen hervorgegangen ist. Staubwinde bringen ihn nach Osten. Nach v. Richthofen erfolgt nun sein Absatz unter dem Einfluß der Steppenvegetation, die wie ein Filter wirkt. Auch Windstillen sind ohne Zweifel von Einfluß. Vielleicht hat aber v. Richthofen doch die Beteiligung des Wassers bei der Lößablagerung unterschätzt. Denn die Lößbildung erfolgt namentlich dort, wo die regelmäßige Regenzeit einsetzt. Der ausgefällte Staub wird von den Gebirgen in die flachen Becken geschwemmt, bezw. der in die Lößbecken fallende Regen bringt ihn auf die Steppenfläche herab. Dabei handelt es sich nicht um stehendes Wasser, sondern um schnell versickernden Regen. So erklärt sich die Beckenlagerung des Lößes und so können auch die Einwände gegen äolische Entstehung, die namentlich bei dem diluvialen Löß in Deutschland geltend gemacht worden sind, erklärt werden. Nicht Wind allein, auch das Wasser ist bei seiner Ablagerung stark beteiligt. Moderner Löß ist in ganz Zentralasien, Turkestan, Kleinasien verbreitet, und geht dann über in den diluvialen europäischen Löß, der sich in breiten Streifen südlich der glazialen Ablagerungen von Ru-

mänien über Ungarn, Mittel- und Süddeutschland nach Belgien und Nordfrankreich zieht. Ferner finden sich Lößablagerungen in Südaustralien gerade da, wo die Winterregenzone an die Viktoriawüste grenzt. Lößähnliche Böden haben eine ungeheure Verbreitung in den Pampas, Llanos und in den Prärien Nordamerikas.

Schwarzerde — Tschernosjom ist ein Löß, der oberflächlich durch Humusabscheidungen schwarz gefärbt ist. Die „Atmosphäre" spielt insofern eine Rolle, als kalte Winter, mit periodischem üppigen Kraut- und Graswuchs vereint, die Ausfällung und Konservierung der Humussubstanzen unter Vermischung mit Staubablagerungen veranlassen dürften.

3d) Wüsten. Bedingungen der Winderosion. Das Hauptgebiet der Windtätigkeit sind die Wüsten und zwar aus folgenden Gründen. Einmal ist die Insolationswirkung, die Staub bis zu gröbsten Schutt entstehen läßt, sehr groß. Die Austrocknung des Bodens ist infolge der Hitze und Lufttrockenheit hier wohl größer als irgendwo. Der Wind ist im Mittel wohl nicht besonders heftig, wenn auch Orkane — namentlich kurze, als starke Tornados keine Seltenheit sind. Dagegen ist die Trombenbildung groß und wirksam. Am wichtigsten aber ist die Armut an Vegetation. Kein Schatten hält den Boden feucht, der Wind wird nicht gehindert. Andererseits fördern Tiere gar nicht oder nur in geringem Grade die Winderosion.

Formen der Winderosion. Die Frage, welche Erscheinungen in Wüsten auf Winderosion zurückgeführt werden müssen, ist nicht leicht zu beantworten. Einmal kommen gelegentlich starke und sehr wirksame Regengüsse vor, die gewaltige Schuttmassen in den Wadis herabschaffen können, vor allem aber liegt vor der heutigen Zeit die Pluvialzeit, deren Wirkungen in Form von Flußbetten, Schotterablagerungen, Kalktuffen u. a. m. oft sehr deutlich in Erscheinung treten und daher mit moderner Wasserwirkung verwechselt werden können. Während ein sehr großer Teil von Forschern — namentlich in Amerika, wo die Wüsten z. T. mehr Salzsteppen genannt werden müssen — dem Winde nur eine ganz bescheidene Rolle anweisen, steht J. Walther auf dem entgegengesetzten Standpunkt, indem er die Pluvialzeit leugnet und alle Erscheinungen, auch die Wadis hauptsächlich durch Winderosion erklären will. Lehrreich und wichtig sind die Beobachtungen Burmesters, der von den Wadis Aegyptens angibt, daß in den großen noch die Wassererosion dominiere, in den kleinen sich dagegen überall die „Schutzrinden" bildeten als Zeichen herrschender Wüstenverwitterung.

Ebenso wie die Wadis ist auch die Entstehung der Zeugenberge durch Winderosion allein stark bezweifelt worden, da sie jedoch z. T. in recht ebenen, niederschlagsärmeren Wüsten auftreten, weit ab von allen Wadis könnten sie sehr wohl ganz überwiegend durch Winderosion entstanden sein.

Ein Gegenstand des Streites ist ferner die Mechanik der Windwirkung. Walther hält die „Deflation" für das Hauptagenz. Allein da diese aus Ablation und Korrasion bestehen soll, ist Deflation identisch mit Winderosion, also ein entbehrliches Wort. Fragt man aber, was wirksamer ist, ob Windablation oder Windkorrasion, so muß man folgendes sagen. Ueberall, wo Sand vorhanden ist — und dieser fehlt wohl nur selten in Wüsten, wenn er auch spärlich sein kann — spielt der Sandschliff die entscheidende Rolle, zumal dort, wo die Gesteine nicht zu feinblätterigen und staubigen Zerfall neigen. Außerdem ist die Korrasion am stärksten in den Ebenen und am Fuß der Berge. Der abgestürzte Schutt wird zerrieben und so die steilen, mit geringer Schuttböschung aufragenden Berge gebildet. Je höher man über die Ebene steigt, um so mehr läßt der Sandschliff nach und um so mehr kann Ablation hinzutreten. Allein da die abgehobenen Teilchen sofort selbst als Geschosse benutzt werden, hört praktisch die Korrasion nie auf und es ist unmöglich zu sagen, ob eine Ablation allein in größerem Umfang die Hauptrolle spielt.

Regionen der Winderosion. Die Gebiete, in denen Winderosion hauptsächlich zu Hause ist, sind die Gebirgs-, Fels-, Kies- und Lehmwüsten. In den Gebirgs- und Felswüsten sind die Kleinformen, wie Löcher, Höhlen, Grotten, Gitter, Pilzfelsen, sowie die Großformen, wie Zeugenberge, Kessel, Pfannen, Gesteinswälle weit verbreitet. Ein unregelmäßiges Gewirr von Felsen, Zacken, Gipfeln, Kämmen, Löchern, Furchen, Spalten ist die Chebka der algerischen Wüste. Am besten orientiert hierüber das Werk von Gauthier. Auch die Wadis, an deren Ausgestaltung der Wind mindestens mithilft, sind am dichtesten in der Gebirgs- und Felswüste zu finden.

In der Kieswüste oder Hamada — bei besonderer Höhenlage und Ausgestaltung auch Sserîr genannt — ist der Boden meist mit erbsen- bis faustgroßen eckigen Gesteinsstücken bedeckt, an denen man die Bildung der Kantengeschiebe gut studieren kann. Auch die wurmähnlichen Riefen sind sehr entwickelt. Von Hohlformen findet man ganz flache Schalen von einigen hundert Metern Durchmesser, die in Algerien Daia, d.h. Loch heißen. Sie sind wohl durch Winderosion entstanden. Vielleicht haben auch Herdentiere in früherer, regenreicherer Zeit, als das

Land eine Steppe war, zu ihrer Entstehung beigetragen.

Die ganze Hamada ist ein Produkt der Winderosion. Die härtesten Gesteinsstücke sind liegengeblieben und haben sich als Geröllschicht, als Steinpflaster angesammelt. Dieses wird nur allmählich und flächenhaft durch Sandschliff erniedrigt.

In der Lehmwüste, auf deren Entstehung im nächsten Abschnitt über äolische Ablagerungen eingegangen werden soll, kommen die tiefen Furchen vor, die Swen Hedin unter den Namen Schardang aus Zentralasien beschreibt. Auch rundliche und längliche Pfannen werden ausgehöhlt, die sich häufig in Salzpfannen verwandeln. Weitaus am wichtigsten aber ist die flächenhafte Abtragung durch das Sandgebläse, die Ausfuhr der Salze und des Staubes, sowie die Anhäufung des Sandes zu Dünen.

Die Zeugenwüste ist eine richtige Denudationslandschaft und mit der Lehm- und Kieswüste häufig vereinigt. Die Zeugen bestehen dann aus Lehm oder festen Gesteinen, während die schwerzerstörbaren Ueberreste die Kieswüste bedecken. Wegen des Sandschliffs ragen die Zeugen meist mit nur geringer Schuttböschung steil und unvermittelt aus der Ebene auf. Eine Zeugenwüste waren vielleicht einstmals die heutigen Inselberglandschaften im tropischen Afrika und Brasilien, sowie die im subtropischen Südafrika und Australien. Indes könnten sie auch in trockenen Steppen bei Anwesenheit zahlreicher Herden großer Wirbeltiere im Laufe des Mesozoikums und des Tertiärs durch zoogene Winderosion bei gleichzeitigem Wirken flächenhaft abfließenden Regenwassers entstanden sein.

Aeolische Ablagerungen. Charakteristisch für die Wüsten ist die Ausfuhr des Staubes, der durch Winde, — namentlich Tromben — emporgewirbelt wird. Ein großer Teil dieses Staubes gelangt in benachbarte Steppen oder Meere und selbst in die feuchten Regionen der Tropen und unserer Breiten. Ein Teil des Staubes bleibt aber in der Wüste.

Staubablagerungen bilden sich in den Wüsten fortwährend, sind aber vergänglicher Natur. Staub von rötlicher Farbe bedeckt nach jedem Sturm die Dünen und bildet häufig auf ihnen Rippeln. Festgehalten wird er aber gewöhnlich nur, wenn er in Salzpfannen gerät, wo er auf dem nassen Boden kleben bleibt und mit Salzlösungen durchtränkt wird, oder wenn er durch Regenwasser in die abflußlosen Pfannen geschwemmt wird. So können Salzlehmflächen entstehen. Die australischen Tonpfannen halten wohl auch viel äolischen Staub fest, dürften also z. T. äolische Gebilde sein. Freilich ist der Staub in solchen Pfannen immer wieder der Winderosion ausgesetzt.

Sandablagerungen. Weitaus am wichtigsten sind die Dünenbildungen. In den Fels-, Kies- und Lehmwüsten bildet sich der Sand durch Zerstörung von Sandsteinen, sandigen Kalken, Mergeln, Lehmen, daneben auch aus kristallinen Gesteinen. Nach Ausblasen der leichten Bestandteile bleibt grober Schutt, Kies und Sand zurück und letzterer beginnt zu wandern

Dünenformen. In Kies- und Lehmwüsten, wo der Sand nur streckenweise auftritt, beginnt das Reich der Einzeldünen, der Bogendünen, Zungenhügel und Strichdünen, die mit den Winden hin- und herwandern. Allein die Hauptwindrichtung wird schließlich maßgebend. So kann der Sand schließlich aus dem Gebiet eines herrschenden Windes heraus in ein sozusagen neutrales Gebiet geraten, wo mehrere Windsysteme unentschieden kämpfen; dort häuft er sich an. So entstehen große Sandfelder, in denen der Sand alles oder fast alles bedeckt. Häufig sind solche Gebiete gleichzeitig große allseitig geschlossene Niederungen. Die Areggebiete der westlichen Sahara, das Sandfeld der libyschen Wüste, die Nefud und Dehna in Arabien, die Sandwüsten der aralokaspischen Niederung, und des Tarymbeckens, teilweise die Sandfelder der Kalahari wären hier zu nennen.

Die Sandfelder sind nicht gleichartig geformt. In der algerischen Sahara unterscheidet man zwei Arten, Nebka und Areg oder Erg, Namen, die in die wissenschaftliche Nomenklatur aufgenommen werden könnten.

Nebka ist ein Sandfeld mit wenig mächtiger Sanddecke, die ganz unregelmäßige Flächen, Rücken, Kuppen, Furchen und Pfannen besitzt. Flüchtige Barchane sind dort häufig. Es ist die Region, in der die Dünenbildung an Büschen beginnt, die Vertiefungen gehen häufig bis auf das Grundgestein hinab — in Algerien pleistozäne Lehme und Sandsteine. Der kahle Boden wird vom Sand geschliffen und ausgetieft. Dabei entstehen Staub, der fortfliegt, und Sand, der liegen bleibt. In der Nebka entsteht also der Sand.

Das Erg ist dagegen ein Sandfeld aus Walldünen, das mit dem Wandern des Sandes allmählich aus der Nebka entsteht. Die Wälle streichen einander parallel, wenn auch zahlreiche Unregelmäßigkeiten vorkommen und breite Zwischenräume liegen zwischen ihnen, in denen der Untergrund hervortreten, Quellen und gute Weide sich finden können. Während in manchen Dünengebieten ein Vorrücken des Sandes deutlich ist, so z. B. in den aralokaspischen Wüsten, stehen andere still, so daß sie seit Jahrhunderten als Wegweiser dienen und Brunnen an ihrem Fuß bestehen bleiben. Die Erklärung für solchen Stillstand ist oft

versucht, allein noch nicht einwandfrei gefunden worden. Jedenfalls können die Walldünen der Wüste auf verschiedene Weise entstehen und aus verschiedenen Gründen unbeweglich sein. Einmal können sie einen Gesteinskern besitzen. Vatonne hat auf dem Wege nach Ghadamès die Entstehung solcher Dünen in allen Uebergängen verfolgen können. Genau dasselbe kann man in der Kalahari feststellen, z. B. im Chansefeld. Wenn also eine alte äolische Denudationslandschaft aus aufgerichteten Schichten besteht, deren widerstandsfähigste Gesteine in Form langer paralleler Wälle herausgewittert sind, so können lange Walldünen bei Versandung des Gebietes entstehen, und zwar feststehende Walldünen.

Ein anderer Erklärungsversuch weist darauf hin, daß die Walldünen sich in einem Gebiet wechselnder Winde befinden und daß diese sich ungefähr das Gleichgewicht halten. Daher sollten die Dünen nur langsam oder gar nicht wandern. Außerdem macht man auf die große Höhe der Dünen — bis 200 m — und die großen Sandmengen, die bewegt werden müssen, aufmerksam. Auch sind ja, von vereinzelten Stürmen abgesehen, die Winde in subtropischen Wüsten nicht sehr kräftig. Also wandern die großen Walldünen der Wüsten, worauf Zittel besonders hingewiesen hat, nur sehr langsam. Schließlich hat nach dem Vorgang von Baschin namentlich Solger das Helmholtzsche Gesetz der Wellenbildung herangezogen. Das Charakteristische der Sandwüsten besteht seiner Meinung nach in der primären Anhäufung von Sanden, die nun durch den maßgebenden Wind in Wellen angeordnet werden, und zwar bleibt der Sand in den Knoten der vom Wind gebildeten Longitudinalwellen liegen. Die Wellen bilden sich langsam, werden dafür aber auch um so höher und es wächst der Kammabstand, je länger und stärker die Kraft wirkt. Nun hat Swen Hedin in den Sandwüsten des Tarymbeckens beobachtet, daß die Richtung der Dünen mit der heutigen Hauptwindrichtung nicht übereinstimmt, daß sich zu letzterer z. T. Querdünen gebildet haben. Solger ist geneigt, anzunehmen, daß — vorausgesetzt, daß Hedins Angaben über die heutigen Winde richtig sind — das Walldünensystem in einer Zeit gebildet worden ist, als andere Winde, nämlich senkrecht zur Längsachse der Walldünen, herrschten und daß jetzt eine allmähliche Umlagerung eintritt unter Entstehung eines Gitterwerks von Dünen.

Schließlich muß noch erwähnt werden, daß Foureau in dem Erggebiet zwischen dem Tuareghochland und der südalgerischen Chottregion beobachtet hat, daß die Sandwälle den alten Flußläufen der Pluvialzeit parallel laufen und daher ist er der Ansicht, daß letztere für die Richtung der Walldünen von entscheidender Bedeutung sind. In der Kalahari kann man Aehnliches beobachten.

Die Fragen sind noch ungeklärt, vor allem fehlt es noch an den meteorologischen Grundlagen, namentlich auch an systematischen Beobachtungen über die Wirkung der Winde aus verschiedenen Richtungen. Auch über die pluvialen Flüsse und ihr Verhältnis zu den Dünen fehlt es noch an genauen kartographischen und geologischen Aufnahmen.

Eigenartige Verhältnisse herrschen in der Namib. Denn es entstehen an der Küste die Dünen aus Meeressanden, erst weiter im Innern kommen in der Wüste entstandene Sande hinzu. Da es aber an der notwendigen Vegetation mangelt, entwickeln sich nicht wie bei uns Stranddünen, sondern Barchane, Strichdünen und schließlich Walldünen, die in langen parallelen Reihen angeordnet sind. Auffallend ist ferner die Einwirkung der Wadis, die, wie z. B. der Kuisib, den Dünen ein plötzliches Ende bereiten. Uebrigens sind die Verhältnisse dort noch nicht näher studiert

Der Passatstaub. Zum Schluß sei noch auf eine Erscheinung hingewiesen, die sich zuweilen auch bei uns zeigt, nämlich die Staubfälle, die aus der Sahara stammen. Längst bekannt und nicht schwer zu erklären, ist der rötliche Passatstaub, der durch östliche Winde über das Meer westlich der Sahara hinausgetragen wird. Die Massen dürften bedeutend sein. Es kommt aber gar nicht so selten vor, daß bei der Entwickelung eines Tiefdruckwirbels über der algerischen und marokkanischen Sahara Staubmassen in enormer Menge aufgewirbelt und durch südliche Luftströmungen oft wohl auf großen Umwegen nach Europa getragen werden, wo sie durch Regen und Schnee gefällt werden (Staubregen, Blutregen, Schmutzregen). Hellmann und Meinardus haben den großen Staubfall vom 9. bis 12. März 1901 genauer untersucht und die Herkunft des Staubes aus der Sahara sowie die meteorologischen Bedingungen festgestellt. Wichtig ist namentlich auch die Berechnung der Menge des auf europäischen Boden gefallenen Staubes. Sie beläuft sich hier auf mindestens 1,8 Millionen Tonnen, die im afrikanischen Küstengebiet gefallenen Mengen aber auf mindestens 150 Millionen Tonnen! Und diese schier unfaßbaren Massen hat der Wind in einem einzigen Tiefdruckwirbel emporgehoben und weithin transportiert. Nehmen wir das Gebiet, das den Staub geliefert hat auf 10 Breitengrade im Quadrat an, so hat der Wind von jedem Quadratkilometer rund 170 cbm Staub aufgehoben. Solche Zahlen zeigen am besten, welche Bedeutung der Wind als geologisches Agens besitzt.

Literatur. **Baschin**, *Die Entstehung wellenähnlicher Oberflächenformen. Ztschr. d. Ges. f. Erdkunde zu Berlin, Bd. 34, 1899.* — **Derselbe**, *Dünenstudien. Zeitsch. d. Ges. f. Erdkunde zu Berlin, 1903.* — **Élie de Beaumont**, *Leçons de géologie pratique, Bd. I, 1845.* — **Berendt**, *Geologie des Kurischen Haffes. Königsberg 1869.* — **E. Bertoly**, *Kräuselungsmarken u. Dünen. Münchener Geogr. Studien, München 1908.* — **G. Braun**, *Entwickelungsgeschichtliche Studien an europäischen Flachlandküsten und ihren Dünen. Veröffentlichungen des Instituts für Meereskunde und des Geographischen Instituts an der Universität Berlin, Heft 15, Berlin 1911.* — **Burmester**, *Einige Beobachtungen über tropische Schutzkrusten u. Wadibildungen, Bd. 98, Globus 1910.* — **Vaughan Cornish**, *On the formation of sand-dunes. Geogr. Journal, Bd. IX, London 1897.* — **Cholnoky**, *Die Bewegungsgesetze des Flugsandes. Foldtani Köplöni, Bd. XXXII, 1902.* — **R. Chudeau**, *Sahara Soudanais. Paris 1909.* — **H. Cloos**, *Geologische Beobachtungen in Südafrika. 1. Wind und Wüste im deutschen Namalande. Neues Jahrbuch für Mineralogie, Geol. und Paläont., Stuttgart 1911.* — **Cowles**, *The Ecological Relations of the Vegetations of Sand Dunes of Lake Michigan. Botanical Gazette, Vol. XXVIII, 1899.* — *Dünenbuch, Werden und Wandern der Dünen. Pflanzen- u. Tierleben auf den Dünen. Dünenbau. Von* **Solger, Graebner, Thienemann, Speiser, F. W. O. Schulze**, *Stuttgart 1910.* — **G. H. Darwin**, *On the formation of ripplemarks in Sand. Procced of the Roy, Soc. of London, Bd. 36.* — **Forchhammer**, *Geognostische Studien am Meeres-Ufer. Neues Jahrb. für Mineralogie, 1841.* — **Foureau**, *Documents scientifiques de la Mission Saharienne Mission Foureau-Lamy d'Alger au Congo par le Tchad, Paris 1903 bis 1905. — Mission au Sahara Bd. I.* **Gauthier**, *Sahara Algérien, Paris 1908.* — **S. v. Hedin**, *Scientific Results of a journey in Central-Asia 1899 bis 1902, Stockholm 1904.* — **G. Hellman und W. Meinardus**, *Der große Staubfall vom 9. bis 12. März 1901 in Nordafrika, Süd- und Mitteleuropa. Abhandlungen des Kgl. Preuß. Meteorologischen Instituts, Bd. II, Nr. 1, Berlin 1901.* — **Jentsch**, *Geologie der Dünen. In Gerhard, Handbuch des deutschen Dünenbaus, Berlin 1900.* — **Jordan**, *Physische Geographie und Meteorologie der Libyschen Wüsten 1876.* — **Loczy**, *Die Beschreibung der geologischen Beobachtungen und deren Resultate der Reise des Grafen Bela Széchényi in Ostasien, Budapest 1893.* — **A. v. Middendorf**, *Einblicke ins Ferghanatal. Mémoir de l'Académie de St. Petersburg, Bd. 29, 1881.* — **Ed. Moritz**, *Die Tirashochfläche. Mitteilungen aus den deutschen Schutzgebieten, Bd. 23, 1910.* — **S. Passarge**, *Die Kalahari, Berlin 1904.* — **Derselbe**, *Ueber Rumpfflächen und Inselberge. Zeitschr. d. geog. Gesellschaft, Berlin 1904.* — **Derselbe**, *Die pfannenförmigen Hohlformen der südafrikanischen Steppen. Petermanns Mitteilungen 1911.* — **Derselbe**, *Verwitterung und Abtragung in den Steppen und Wüsten Algeriens. Verhandl. des 17. deutschen Geographentages zu Lübeck, Berlin 1910.* — **Derselbe**, *Physiologische Morphologie. Hamburg 1912.* — **Pechuel-Lösche**, *Zur Kenntnis des Hererolandes. Das Ausland, S. 823f., 1886.* — **Raman**, *Bodenkunde. Berlin 1911.* — **J. Reinke**, *Die Entwickelungsgeschichte der Dünen an der Westküste von Schleswig. Sitzungsber. d. Kgl. Preuß. Akademie der Wissenschaften zu Berlin 1903.* — **Derselbe**, *Botanisch-geologische Streifzüge an den Küsten des Herzogtums Schleswig. Wiss. Meeresuntersuch. hsg. von d. Kieler Kommission, N. F. XIII, Erg. H. 1903.* — **Derselbe**, *Die Ostfriesischen Inseln. Ebenda X, Erg. H. 1909.* — **Derselbe**, *Studien über die Dünen unserer Ostseeküste. Ebenda. N. F. XII, 1911.* — **F. v. Richthofen**, *China. Bd. I, 1877.* — **Rolland**, *Sur les grandes dunes de sable du Sahara. Bulletin de la Société Gélogique de France, Bd. 10, 1882.* — **Derselbe**, *Géologie du Sahara algérien. Paris 1890.* — **Sokolow**, *Die Dünen. Berlin 1894.* — **F. Solger**, *Studien über Standort deutscher Inlanddünen. Forschungen zur deutschen Landes- und Volkskunde, Bd. 19, Stuttgart 1910. — Mission de Ghadamès,* **Vatonne**, *Études sur les terrains et sur les eaux des pays traversée par la mission. Alger 1863.* — **J. Walther**, *Das Gesetz der Wüstenbildung. Berlin 1900.* — **Derselbe**, *Die Denudation in der Wüste. Abhandlungen der Kgl. sächsischen Gesellscheft der Wissenschaften. 27. Bd. der mathematischen Klasse 16, 1891.* — **Zittel**, *Beiträge zur Geologie und Paläontologie der libyschen Wüste. Paläontographica, Bd. 30, 1883.*

S. Passarge.

Atmosphäre.

Physikalisch - chemisches Verhalten der Luft.

1. Druck, Masse und Dichte der Luft. 2. Chemische Zusammensetzung. 3. Einwirkung auf Mineralien und Gesteine. 4. Bedeutung für die Tier- und Pflanzenwelt. 5. Vermutliche Veränderungen in der Zusammensetzung in Vergangenheit und Zukunft.

1. Druck, Masse und Dichte. Als Atmosphäre bezeichnet man im allgemeinen die einen Himmelskörper umgebende Gashülle, im besonderen die Lufthülle der Erde. Infolge ihrer Schwere übt sie auf ihre Unterlage und jeden in ihr befindlichen Körper einen Druck (Luftdruck) aus. Dieser wird gemessen durch die Höhe einer Quecksilbersäule, die ihm das Gleichgewicht hält (Barometer). Der Luftdruck (Barometerstand) ist abhängig von den meteorologischen Zuständen der Atmosphäre; an der Meeresoberfläche beträgt er im Mittel 760 mm Quecksilber oder 1,033 kg auf 1 qcm. Hieraus läßt sich die Masse der gesamten Atmosphäre berechnen; sie beträgt rund noch nicht ein Millionstel der Erdmasse. Mit zunehmender Höhe nimmt der Druck ab; die Abhängigkeit ist gegeben durch die Formel

$$h = 18432 \ (\log b - \log b_1)$$

wobei b und b_1 die Barometerstände zweier Orte bedeuten, deren Höhenunterschied h ist.

Die Dichte der Luft hängt wie bei jedem Gas vom Druck und von der Temperatur ab. Unter normalen Verhältnissen d. h. bei einem Druck von 760 mm Quecksilber und der

Temperatur 0° ist die Dichte trockner Luft 0,001293. Im Durchschnitt kann man das Gewicht von 1 ccm Luft zu 1,2 mg annehmen. Ein Liter Luft wiegt demnach 1,2 g und 1 cbm 1,2 kg. Da die Dichte der Luft ebenso wie der Druck mit zunehmender Höhe allmählich abnimmt, kann man von einer Grenze der Atmosphäre und daher auch von einer bestimmten Höhe nicht sprechen. In 75 km Höhe ist die Dichte nur noch $^1/_{10000}$ der Dichte am Meeresspiegel.

2. Chemische Zusammensetzung. Bis zum Ende des 18. Jahrhunderts hielt man die Luft für ein Element. Erst Priestley und Scheele erkannten am Ende jenes Jahrhunderts, daß sie ein Gemisch von zwei Gasen, Sauerstoff und Stickstoff, ist. Das Verhältnis von 20,8 T. Sauerstoff und 79,2 T. Stickstoff wurde zuerst von Cavendish bestimmt, der auch feststellte, daß die Zusammensetzung stets die gleiche ist. Dies ist seitdem durch viele Luftanalysen, namentlich von Bunsen, Regnault und in neuerer Zeit von Hempel im wesentlichen bestätigt worden.

Cavendish hatte auch bereits erkannt, daß außer Sauerstoff und Stickstoff noch ein dritter Bestandteil in der Luft vorhanden ist. Seine Beobachtungen wurden aber völlig vergessen und erst am Ende des vorigen Jahrhunderts haben Rayleigh und Ramsay das von ihnen Argon genannte Gas wieder entdeckt und genauer untersucht. Nach den sorgfältigsten Messungen enthalten 100 T. trockene Luft

	dem Raum nach	dem Gewicht nach
Stickstoff . . .	78,13	75,5
Sauerstoff . . .	20,93	23,2
Argon	0,94	1,3

Die örtlichen und zeitlichen Schwankungen in der Zusammensetzung der Luft sind äußerst geringfügig und nach den bisherigen Beobachtungen von der Witterung völlig unabhängig.

Neben diesen Hauptbestandteilen enthält die Luft noch einige weitere Gase in sehr geringer Menge, besonders Kohlensäure, Wasserdampf und einige dem Argon ähnliche Gase.

Der Gehalt an Kohlensäure schwankt zwischen 2,5 bis 3,5 T. auf 10000 Raumteilen Luft, beträgt also im Mittel 0,03%. Ueber dem Festland ist er in der Nacht durchschnittlich um 0,2 bis 0,3 T. höher als am Tage; über dem Meer ist ein Unterschied kaum vorhanden. In großen Städten wird die Kohlensäuremenge durch örtliche Verhältnisse stark beeinflußt; im Durchschnitt ist sie aber selbst in Großstädten nur wenig (0,2 bis 0,3 T. auf 10000) höher als auf dem Lande. Verbrennungs- und Verwesungsvorgänge, sowie auch die Einwirkungen der Pflanzenwelt machen sich nur in der allernächsten Nähe bemerkbar; nur vulkanische Erscheinungen vermögen den Kohlensäuregehalt auch auf größere Entfernungen hin zu beeinflussen.

Während Regen keine merkliche Wirkung auf die Kohlensäuremenge ausübt, wird sie durch Nebel oder Schnee ein wenig vermehrt, ebenso auch durch sehr starke Abkühlung (—10°). Diese, wie auch die nächtliche Zunahme des Kohlensäuregehaltes ist wohl nur eine Folge der langsameren Vermischung der unteren, kohlensäurereicheren Luftschichten mit den höheren. Starke Abnahme des Luftdrucks bewirkt ebenfalls ein Anwachsen der Kohlensäure, wohl deshalb, weil dadurch größere Mengen Luft aus dem Erdboden austreten; die Bodenluft ist aber infolge der sich im Boden abspielenden Verwesungsvorgänge im allgemeinen reicher an Kohlensäure als die Luft der freien Atmosphäre. In gleichem Sinne wirkt die Druckverminderung auch auf die vom Wasser absorbierte Kohlensäure.

Alle Schwankungen im Kohlensäuregehalt der Luft werden durch den Einfluß des Meeres in hohem Maße ausgeglichen, indem dieses bei einer Zunahme der Kohlensäure große Mengen davon absorbiert, die es bei einer Abnahme ebenso leicht wieder abgibt.

Die Luft enthält ferner wechselnde Mengen Wasserdampf, ist aber nur ausnahmsweise damit gesättigt.

Außer Argon kommen auch alle anderen Edelgase in der Luft vor, allerdings nur in äußerst geringen Mengen. Nach Ramsay enthalten 1 Million Teile Luft

	Raumteile	Gewichtsteile
Helium	4	0,56
Neon.	12,3	8,6
Krypton	98	280
Xenon	11	50

Weiterhin sind noch äußerst geringe Mengen von Wasserstoff und Kohlenwasserstoffen, sowie von Ozon, Stickstoffoxyden, Ammoniak und radioaktiven Stoffen in der Luft enthalten.

Alles, was wir über die Zusammensetzung der Atmosphäre wissen, bezieht sich zunächst nur auf ihre tieferen Schichten, die allein der unmittelbaren Untersuchung zugänglich sind. Temperaturbeobachtungen haben zur Annahme einer bedeutungsvollen Grenze in durchschnittlich 11 km Höhe geführt. Der bis hierhin reichende Teil, den man als Troposphäre bezeichnet, ist der Schauplatz der gewöhnlichen meteorologischen Erscheinungen; an Masse macht er etwa $^3/_4$ der ganzen Atmosphäre aus. Die Troposphäre hat im wesentlichen die uns bekannte Zusammensetzung. Auf Grund von Dämmerungserscheinungen, leuchtenden Nachtwolken, Beobachtungen an Meteoriten u. a. ist von Hann die Ansicht ausgesprochen, daß in größerer Höhe die relative Menge der leichteren Gase schnell anwächst. Der Sauerstoffgehalt nimmt infolgedessen von unten nach oben ständig ab und wird

bei etwa 100 km Höhe Null. Bis zur Höhe von etwa 70 km besteht die Atmosphäre vorwiegend aus Stickstoff; darüber hinaus nimmt aber auch dieser rasch ab und verschwindet bei etwa 120 km völlig, so daß in 100 km Höhe die Atmosphäre fast nur noch aus Wasserstoff besteht.

In neuerer Zeit ist diese Theorie namentlich von Wegener weiter ausgebaut worden. Nach ihm findet sich neben Wasserstoff in den höchsten Schichten der Atmosphäre noch ein leichteres, bisher unbekanntes Gas, das Geokoronium, dem er die auf keinen bekannten Stoff zurückführbare grüne Spektrallinie des Polarlichtes zuschreibt. Der Gehalt an Geokoronium soll mit der Höhe zunehmen, so daß er bei 500 km etwa 93 % beträgt.

Bei diesen Zahlen darf man nicht vergessen, daß es sich bei der außerordentlichen Verdünnung der Gase in diesen Höhen doch nur um äußerst geringe Mengen handelt.

3. Einwirkung auf Mineralien und Gesteine. Sauerstoff, Kohlensäure und Wasser sind die Ursache fast aller chemischer Veränderungen an der Erdoberfläche.

Der Sauerstoff oxydiert das in Mineralien und Gesteinen enthaltene Eisenoxydul zu Eisenoxyd; sulfidische Verbindungen gehen durch ihn in Sulfate über; der Kohlenstoff organischer Stoffe wird zu Kohlensäure verbrannt.

Die Kohlensäure wirkt ebenso wie das Wasser zersetzend auf die Silikate unter Bildung von Karbonaten und wasserhaltigen Verbindungen (vgl. die Artikel „Kreislauf der Stoffe" und „Verwitterung").

4. Bedeutung für die Tier- und Pflanzenwelt. Das Vorhandensein von Sauerstoff und Kohlensäure in der Atmosphäre ist eine Grundbedingung für alles organische Leben. Die Pflanzen nehmen Kohlensäure auf, verbrauchen den Kohlenstoff zum Aufbau organischer Stoffe, während der Sauerstoff als solcher ausgeschieden wird. Der in den Pflanzen festgelegte Kohlenstoff dient den Tieren zur Nahrung und wird durch den bei der Atmung verbrauchten Sauerstoff wieder zu Kohlensäure verbrannt. Wahrscheinlich halten sich beide Vorgänge einigermaßen das Gleichgewicht. Aber selbst wenn dies nicht der Fall wäre, würde sich die Zusammensetzung der Luft in absehbarer Zeit nicht merklich ändern. Würde gar kein Sauerstoff zurückgebildet, so würde durch den Verbrauch der Tierwelt der Sauerstoffgehalt schätzungsweise erst in 1 bis 2000 Jahren um 0,1 % abnehmen (vgl. den Artikel „Kreislauf der Stoffe").

5. Vermutliche Veränderungen in der Zusammensetzung in Vergangenheit und Zukunft. Ueber die Veränderungen in der Zusammensetzung der Atmosphäre während früherer geologischer Zeiträume wissen wir so gut wie gar nichts. Nachdem sich die erste Erstarrungskruste verfestigt und so weit abgekühlt hatte, daß sich das Wasser in flüssiger Form darauf niederschlagen konnte, bestand die ursprüngliche Atmosphäre möglicherweise nur aus Stickstoff und Kohlensäure. Die Hauptmenge des Sauerstoffs ist vielleicht erst durch die Tätigkeit der Pflanzen gebildet worden. Das Vorkommen sauerstoffreicher Verwitterungsprodukte in den ältesten uns bekannten Schichtgesteinen beweist jedoch, daß damals bereits reichliche Mengen von Sauerstoff vorhanden gewesen sein müssen. Aus dem Auftreten einer reichen Insektenwelt im Karbon hat man geschlossen, daß die Luft damals die gleiche Zusammensetzung gehabt habe wie heute; dieser Schluß ist jedoch nicht zwingend, da Insekten auch einen viel höheren Kohlensäuregehalt und niedrigeren Sauerstoffgehalt vertragen können.

Schwankungen im Kohlensäuregehalt sind ebenfalls möglich und sogar sehr wahrscheinlich. Der Kreislauf des Kohlenstoffs in der organischen Welt verläuft so schnell, daß er keinen großen Einfluß auf die Menge der Kohlensäure in der Luft ausüben kann. Die Hauptquelle für die Kohlensäure sind vulkanische Vorgänge, durch die der Atmosphäre ständig große Kohlensäuremengen zugeführt werden. Andererseits wird ihr ebenso ständig durch die Bildung von Karbonaten bei der Verwitterung Kohlensäure entzogen. Beide Vorgänge brauchen sich nicht notwendigerweise das Gleichgewicht zu halten, in verschiedenen geologischen Perioden kann vielmehr der eine oder andere überwogen haben und dadurch der Kohlensäuregehalt zu- oder abgenommen haben. Auf derartige Schwankungen im Kohlensäuregehalt suchen Arrhenius und Frech die Eiszeiten zurückzuführen.

Im großen und ganzen müssen freilich mit fortschreitender Abkühlung der Erde die vulkanischen Vorgänge immer schwächer und die von ihnen gelieferten Kohlensäuremengen immer geringer werden. Durch die Verwitterung wird dagegen auch weiterhin immer mehr Kohlensäure, Sauerstoff und Wasser gebunden, so daß allmählich der relative Stickstoffgehalt zunehmen muß.

Die Gase vieler Mineralquellen sind reich an Stickstoff. Ob dessen Menge hierdurch vermehrt wird, ist jedoch zweifelhaft, da es sich vielleicht nur um Luft handelt, die vom Wasser absorbiert und mit in die Tiefe genommen wurde, wobei sie ihren Sauerstoff durch Oxydationsvorgänge verlor. Wie für den Stickstoff gilt dies auch für das in Quellgasen ebenfalls häufig vorkommende Argon.

Helium und die übrigen Edelgase verdanken ihren Ursprung vielleicht ganz oder doch größtenteils dem Zerfall radioaktiver Stoffe.

Wasserstoff wird der Atmosphäre durch vulkanische Vorgänge zugeführt. Daß seine Menge ebenso wie die des Heliums so sehr gering ist, findet seine Erklärung wohl darin, daß diese leichten Gase infolge ihrer großen Molekulargeschwindigkeit verhältnismäßig leicht in den Weltraum entweichen, sobald sie in solche Höhen gelangen, daß die Anziehungskraft der Erde nicht mehr ausreicht, um sie zurückzuhalten.

Literatur. *Gmelin und Kraut, Handbuch der anorganischen Chemie. Herausgegeben von C. Friedheim. 7. Aufl., Heidelberg 1907, Bd. 1, Abt. 1, S. 50. Hierin ausführliche Lite-*

raturangaben bis 1907. — **W. Ramsay**, *Percentage of the Inactive Gases in the Atmosphere. Proc. Royal Soc. London. Series A. 50, 599.* — **J. Hann**, *Die Zusammensetzung der Atmosphäre. Meteorolog. Zeitschr. 1903, S. 122.* — **A. Wegener**, *Untersuchungen über die obersten Atmosphärenschichten. Physikal. Zeitschr. 12, 170 u. 214.*

W. Meigen.

Atmosphärische Elektrizität.

I. Das elektrische Feld (Potentialgefälle) in der Atmosphäre. 1. Allgemeines, Definition. Zwischen jedem Punkte der freien Atmosphäre und dem Erdboden besteht eine elektrische Spannungsdifferenz, die im allgemeinen mit der Entfernung des Aufpunktes von dem Erdboden zunimmt. Bei schönem Wetter entspricht sie einer positiven Ladung der Luft und einer negativen Ladung der Erde, bei Niederschlägen und in einigen anderen Fällen treten Störungen auf, die mit Schwankungen dieser Potentialdifferenz nach Größe und Richtung verbunden sind.

Es besteht also auch zwischen je zwei Punkten der Atmosphäre eine elektrische Spannungsdifferenz, die auf die Längeneinheit des Abstandes bezogen als Potentialgefälle oder Potentialgradient bezeichnet wird. Wegen der Schichtstruktur der Atmosphäre sind die in horizontaler Richtung gemessenen Gradienten im allgemeinen außerordentlich klein; merkliche Werte zeigt lediglich die Vertikalkomponente. Von dieser wird im folgenden als von dem Potentialgefälle schlechthin die Rede sein.

Das Potentialgefälle wird in üblicher Weise in Volt/m (Volt pro Meter) angegeben. Zur Reduktion des üblichen Maßes auf absolutes elektrostatisches Maß sind die in Volt/m gemessenen Werte durch 30000 zu teilen. Bezeichnet φ das Potential aller wirksamen Ladungen, h die Höhe über dem Boden, ϱ die räumliche Dichte und η die Flächendichte der Ladung, so gelten die Beziehungen:

$$-4\pi\varrho = \frac{d^2\varphi}{dh^2}; \quad -4\pi\eta = \frac{d\varphi}{dh}$$

$\left(\frac{d\varphi}{dh} = \frac{d\varphi}{dh}\right.$ am Erdboden genommen). Man erhält also durch Messung des Potentialgefälles als Funktion der Höhe die Verteilung der elektrischen Ladungen in der Atmosphäre bezw. die Dichte der Flächenladung am Erdboden.

2. Messung und Registrierung des Potentialgefälles. Das absolute (auf die Ebene bezogene) Potentialgefälle mißt man mittels zweier Elektroden oder Kollektoren, die man in meßbarem Vertikalabstand isoliert befestigt und mit den Polen eines Elektrometers verbindet. Ist die abgelesene Potentialdifferenz ΔV Volt, die Höhendifferenz Δh Meter, so ist unter Voraussetzung eines homogenen elektrischen Feldes das Potentialgefälle $\frac{d\varphi}{dh} = \frac{\Delta v}{\Delta h}$. Bei Messungen am Erdboden begnügt man sich häufig mit einer Elektrode, deren Potentialdifferenz gegen den Erdboden bei hinreichend ebenem Gelände unmittelbar das Potentialgefälle ergibt.

Als Elektroden sind neben Flammenkollektoren Tropf- und Spritzkollektoren, aktinoelektrische und radioaktive Elektroden in Gebrauch.

Eine andere Methode zur Messung des Potentialgefälles am Erdboden beruht auf der Messung der Ladung, die ein dem Erdfelde ausgesetzter geerdeter Leiter nach Aufhebung der Ladung innerhalb einer geerdeten Hülle annimmt (C. T. R. Wilson).

Als transportable Elektrometer für Potentialgefällemessungen sind neben dem Gold- oder Aluminiumblattelektrometer (Exner, Elster-Geitel) neuerdings Quarzfadenelektrometer (Wulff, Lutz) in Gebrauch (vgl. den Artikel „Elektrostatische Messungen“).

Zur Registrierung des Potentialgefälles verwendet man eine isoliert an der Wand oder auf dem Dach des Stationsgebäudes befestigte Elektrode, die mit einem photographisch (Mascart, Elster-Geitel) oder mechanisch (Benndorf) registrierenden Elektrometer verbunden ist. Die von einer

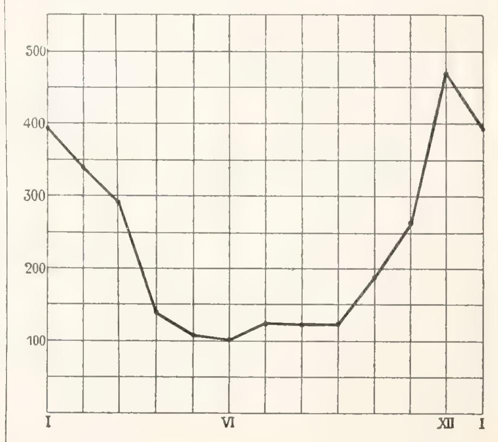
solchen Elektrode in gegebener geerdeter Umgebung registrierten Relativwerte des Potentialgefälles werden durch Simultanmessungen in der Nachbarschaft der Station auf die Ebene reduziert.

Bei Messungen des Potentialgefälles im Freiballon verwendet man zwei Kollektoren in hinreichendem Abstande vom Ballonkorbe, um Störungen durch die Influenzladungen des Ballons zu vermeiden. Eigenladungen des Ballons, die durch Gebrauch trockenen Ballastsandes leicht in störender Größe erzeugt werden, macht man durch einen besonderen Entladekollektor oder durch Gebrauch von Wasserballast unschädlich.

3. Das Beobachtungsmaterial. Unsere Kenntnis des Potentialgefälles am Erdboden ist noch eine sehr unvollkommene; die Festlandsbeobachtungen sind verhältnismäßig zahlreiche aus der gemäßigten Zone, spärliche aus polaren und tropischen Gegenden. Vom Meere liegen nur vereinzelte Messungsreihen vor. Von dem gesamten Material bezieht sich nur ein Bruchteil auf absolute Werte. Mit Sicherheit läßt sich jedoch jetzt schon sagen, daß Abweichungen von dem positiven Vorzeichen an störungsfreien Tagen nicht vorkommen und daß auch die Werte des Potentialgefälles überall von der Größenordnung 100 Volt/m sind.

4. Jährlicher und täglicher Gang des Potentialgefälles. Der Verlauf des Potentialgefälles zeigt selbst an niederschlagsfreien Tagen bei dauernd positivem Vorzeichen starke und anscheinend unregelmäßige Schwankungen. Die Bearbeitung eines über längere Zeit ausgedehnten Beobachtungsmaterials mittels der harmonischen Analyse läßt einen deutlich ausgeprägten jährlichen und täglichen Gang erkennen. Danach besitzt in unseren Breiten das Potentialgefälle ein Maximum in den Wintermonaten (etwa 450 Volt/m), von dem es im Frühling steil zu einem flachen Minimum (etwa 100 Volt/m) abfällt, um erst im Herbst wieder steil zu seiner winterlichen Höhe anzusteigen. Als Beispiel stellt die beigegebene Kurve den jährlichen Gang des Potentialgefälles nach den in Wolfenbüttel erhaltenen Monatsmitteln dar.

Der tägliche Gang des Potentialgefälles läßt sich darstellen als Superposition einer einfachen und einer doppelten täglichen Periode und zwar tritt an vielen Stationen in den Wintermonaten mehr die einfache, in den Sommermonaten mehr die doppelte Periode hervor. An polaren Stationen ist der tägliche Verlauf des Potentialgefälles mehr durch eine dem Wintertypus entsprechende einfache Welle, an tropischen scheint er mehr durch eine doppelte Welle charakterisiert. Die einfache Welle zeigt ihr Maximum am Tage, ihr Minimum in der Nacht; durch den Hinzutritt der doppelten Welle wird das Tagesmaximum in ein Vormittags- und ein Abendmaximum unterteilt, das nächtliche Minimum bleibt bestehen. Doch unterliegt die Phase der doppelten Welle von Station zu Station gewissen Schwankungen. Die doppelte Periode ist ein Phänomen der untersten, dem Erdboden



unmittelbar anliegenden Luftschichten. In ähnlicher Weise scheinen auch die Amplituden der einfachen täglichen und jährlichen Periode mit der Erhebung über den Erdboden merklich abzunehmen. An bewölkten Tagen oder bei Bodennebel zeigt das Potentialgefälle große, unregelmäßige Schwankungen; das Tagesmittel ist kleiner als an heiteren Tagen.

5. Die Abhängigkeit des Potentialgefälles von meteorologischen Elementen. Die Abhängigkeit des Potentialgefälles von der Jahres- und Tageszeit steht in Analogie zu dem ähnlichen Verhalten der übrigen meteorologischen Elemente, so daß es nahe liegt, nach unmittelbaren Zusammenhängen des Potentialgefälles mit einzelnen dieser Faktoren zu suchen. Mit Sicherheit lassen sich solche gesetzmäßige Beziehungen nicht nachweisen, da die einzelnen meteorologischen Elemente untereinander in verwickelten Zusammenhängen stehen, die es unmöglich machen, zwischen mittelbaren und unmittelbaren Einwirkungen der betreffenden Elemente auf das Potentialgefälle zu unterscheiden. Die rein statistische Methode kann nur eine zahlenmäßige Beschreibung der vorliegenden Phänomene liefern.

In einzelnen Fällen läßt sich aber aus der Ionenhypothese der Elektrizitätsleitung in Gasen eine unmittelbare Abhängigkeit vermuten. Diese ist in allen denjenigen Fällen wahrscheinlich, für welche die Ionenhypothese einen unmittelbaren Zusammen-

hang mit der Leitfähigkeit der Luft ergibt. Aenderungen der Leitfähigkeit sind nämlich im allgemeinen, worauf weiter unten (vgl. S. 635) noch näher eingegangen werden wird, mit Aenderungen des Potential gefälles verknüpft der Art, daß einer Abnahme der Leitfähigkeit eine Zunahme des Potentialgefälles entspricht und umgekehrt.

Von allen meteorologischen Elementen zeigt der Gehalt der Luft an Staub- und Dunstteilchen, der sich am besten aus der Durchsichtigkeit der Luft schätzen läßt, den auffälligsten Einfluß auf das Potentialgefälle. An den Staub- und Dunstteilchen werden dauernd die in der Luft erzeugten Ionen gebunden — adsorbiert — wodurch ihre Geschwindigkeit und damit auch die Leitfähigkeit der Luft herabgesetzt wird. Je größer also die Anzahl der Adsorptionskerne ist, desto kleiner wird bei gleicher Ionisierungsstärke die Anzahl der freien (leichtbeweglichen) Ionen sein; es wird also mit wachsender Zahl der Adsorptionskerne die Leitfähigkeit sinken, das Potentialgefälle entsprechend steigen. In der Tat läßt das Beobachtungsmaterial eine weitgehende Uebereinstimmung in dem Gange der Lufttrübung und des Potentialgefälles erkennen.

Es ist einleuchtend, daß alle meteorologischen Faktoren, die die Lufttrübung beeinflussen, auch auf das Potentialgefälle einwirken müssen. So ist die Wirkung der allgemeinen Wetterlage zu verstehen; bei antizyklonaler Wetterlage (in Mitteleuropa bei vorwiegend östlichen Windrichtungen) besteht Neigung zur Ausbildung dunstiger Stabilitätsschichten, mit denen hohes Potentialgefälle verbunden zu sein pflegt, bei zyklonaler Wetterlage mit ihrer größeren Luftreinheit wird kleineres Potentialgefälle beobachtet.

Der Einfluß, den die antizyklonale oder zyklonale Wetterlage mittelbar durch ihre Wirkung auf die Lufttrübung und das Potentialgefälle ausübt, wird unterstützt durch die mit der Wetterlage verknüpften Luftdruckänderungen. Noch deutlicher als bei den nichtperiodischen Luftdruckänderungen tritt dieser Parallelismus mit dem Gange des Potentialgefälles bei den periodischen Druckänderungen hervor. In der Tat besteht eine auffallende Aehnlichkeit insbesondere zwischen der halbtägigen Periode des Luftdruckes und derjenigen des Potentialgefälles, die vielleicht durch eine Einwirkung der Luftdruckschwankungen auf die Leitfähigkeit zu erklären ist, auf die weiter unten eingegangen werden soll.

Die Lufttemperatur zeigt einen deutlichen Einfluß auf das Potentialgefälle, wie schon aus der jährlichen Periode des Potentialgefälles zu vermuten ist, der Art, daß niedrigen Temperaturen hohe Werte des Potentialgefälles entsprechen und umgekehrt. Wahrscheinlich bewirkt erhöhte Temperatur durch Erzeugung aufsteigender Luftbewegung in der Nähe des Bodens sinkenden Luftdruck und damit steigende Leitfähigkeit, sinkendes Potentialgefälle. Von der Einwirkung der Lufttemperatur auf das Potentialgefälle läßt sich nur schwer der Einfluß der Bodentemperatur, des Dampfdruckes und der Sonnenstrahlung trennen. Alle diese Elemente wirken im gleichen Sinne auf das Potentialgefälle ein wie die Lufttemperatur. Vielleicht besteht bei der Bodentemperatur ein naher Zusammenhang mit der Leitfähigkeit der Luft und dadurch auch mit dem Potentialgefälle.

Ein weitgehender Parallelismus in dem Einfluß des Dampfdruckes und der ultravioletten Sonnenstrahlung auf das Potentialgefälle, der durch Elster und Geitel festgestellt wurde, erklärt sich wahrscheinlich aus dem Verlaufe der Lufttrübung, der im allgemeinen der entgegengesetzte ist, wie der Gang dieser beiden Elemente.

Eine Abhängigkeit des Potentialgefälles von der relativen Feuchtigkeit ist nicht nachweisbar.

An manchen Stationen zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit des Potentialgefälles von der Windrichtung, die in vielen Fällen aus den lokalen Umständen verständlich wird. So wird die Lufttrübung bei See- oder Landwinden eine verschiedene sein, und dadurch auch das Potentialgefälle von der Windrichtung abhängig erscheinen. Die Berücksichtigung der Verteilung radioaktiver Ionisatoren (vgl. unten S. 638) über die Erdoberfläche und der durch diese hervorgerufenen Aenderungen der Leitfähigkeit der Luft mit der Windrichtung wird voraussichtlich geeignet sein, lokale Anomalien im Verlaufe des Potentialgefälles, die charakteristischen Eigentümlichkeiten des „luftelektrischen Klimas“ mancher Station zu erklären. Ein Einfluß der Windgeschwindigkeit auf das Potentialgefälle zeigt sich nur bei sehr großen Windgeschwindigkeiten in einer Erniedrigung des Potentialgefälles, die bis zur Abnahme auf negative Werte führen kann. Diese Einwirkung tritt vermutlich überall da auf, wo bei großer Trokenheit Sand oder Staub und bei großer Kälte feiner Staubschnee aufgewirbelt und von der Luft mitgeführt wird. Diese aufgewirbelten Teilchen nehmen durch Reibung am Boden oder durch Adsorption von Ionen eine negative Ladung an, die die sonst vorhandene positive Ladung der Luft kompensiert oder gar überwiegt, so daß das Potentialgefälle, wenigstens in der unmittelbaren Nachbarschaft des Erdbodens, stark herabgedrückt oder gar negativ werden kann.

Die Bewölkung hat nur in den untersten Schichten der Atmosphäre Einfluß auf das Potentialgefälle, während hohe Wolken (Cirren), ja selbst Cumuluswolken noch keine merkliche Einwirkung erkennen lassen. Die niedrigen Wolken geben Anlaß zu kleinem Potentialgefälle, sobald die niedrigen Wolken sich bis zu Niederschlagsformen entwickeln, kommen beim Potentialgefälle gewisse Störungen vor, auf die weiter unten noch eingegangen werden wird.

Niedrige Dunst- und Nebelschichten erhöhen gewöhnlich das Potentialgefälle am Erdboden; es werden jedoch auch niedrige Bodennebel beobachtet, die mit einer Erniedrigung des Potentialgefälles verbunden sind. Die Erhöhung des Potentialgefälles durch Dunst- und Nebeldecken ist wohl dadurch zu erklären, daß positive Ionen aus der über dem Nebel liegenden Luft in die Nebeldecke hereinwandern, wohin sie ja unter der Wirkung des Potentialgefälles geführt werden; dort werden sie durch die Nebeltröpfchen adsorbiert und geben so zu einer Verminderung des Potentialgefälles oberhalb des Nebels, zu einer Verstärkung des Potentialgefälles im Nebel Anlaß.

6. Das Potentialgefälle in höheren Schichten der Atmosphäre. Von ganz besonderer Wichtigkeit sind die Beobachtungen des Potentialgefälles aus der freien Atmosphäre. Geben sie uns doch die sicherste und vollkommenste Methode zum systematischen Studium der Ladungsverteilung in der Luft, da jede Aenderung des Gefälles mit der Höhe unmittelbar auf eine am Orte der Aenderung liegende Ladung nach Vorzeichen und Größe schließen läßt (vgl. oben S. 627).

Die mittels bemannten Freiballons zugänglichen Schichten der Atmosphäre sind zurzeit in bezug auf den Verlauf des Potentialgefälles besser bekannt, als die in unmittelbarer und in geringer Höhe über dem Boden liegenden Schichten. Wir wollen uns zunächst mit den im Freiballon gewonnenen Resultaten beschäftigen, von denen allerdings nur ein kleiner Teil als hinreichend fehlerfrei betrachtet werden kann, während bei dem Rest ungenügende Berücksichtigung der Eigenladung des Ballons (vor allem durch Verwendung von Sandballast) den Wert der Beobachtungsresultate herabsetzt.

Die Messungen des Potentialgefälles im Freiballon haben übereinstimmend bei verschiedenen Wetterlagen eine Abnahme mit der Höhe ergeben. Während das Gefälle in der Nähe des Erdbodens von der Ordnung 100 Volt/m ist, geht es schon in 1000 m über dem Boden auf etwa 20 bis 30 Volt/m herab um dann in der Höhe von etwa 3000 m unter 10 Volt/m zu sinken. In noch größeren Höhen, aus denen nur wenige Beobachtungen vorliegen, scheint die Abnahme des Potentialgefälles noch langsamer zu erfolgen, so daß z. B. bei antizylkonaler Wetterlage in 5760 m Höhe noch 2,9 Volt/m, bei zyklonaler Wetterlage in 6030 m Höhe noch 7,9 Volt/m gemessen werden konnten (Gerdien). Während der Einfluß der Wetterlage auf das Potentialgefälle in Höhen über 3000 m nur ein geringer zu sein scheint, ist er in geringerer Höhe ein durchaus merklicher. Das Potentialgefälle scheint bis zu mittleren Höhen in zyklonaler Wetterlage größere Werte beizubehalten als in antizyklonaler. Der Verlauf des Potentialgefälles innerhalb der unteren Schichten, die hauptsächlich durch die Bestrahlung des Erdbodens in unregelmäßiger Weise von vertikalen Luftströmen durchsetzt und der Sitz der Cumulusbildung sind, ist räumlich und zeitlich stark wechselnd. Auch innerhalb von Schichtwolken (Stratocumulus) sind übereinander Gebiete mit abwechselnd abnehmendem und zunehmendem Gefälle beobachtet worden.

Besonders starke Aenderungen des Potentialgefälles treten an der oberen und unteren Grenze von Dunstschichten auf, wo sich vermutlich durch Einwanderung und Adsorption von Ionen starke Ladungsdichten bilden können. Die Messungen ergeben allgemein ein Anwachsen des Potentialgefälles mit größerem Gehalt an Adsorptionskernen, doch scheint das elektrische Feld nicht immer die einfache Schichtstruktur der Dunst- und Wolkenschichten zu haben. In Stratocumulusdecken, z. B. scheinen schichtenförmige Anordnungen der Ladungen nicht zu bestehen; sie werden hier vermutlich durch lokale auf- und absteigende Luftströme zerstört, so daß auch im Innern der Wolkendecke Ladungen wechselnden Vorzeichens gefunden werden können.

Der allgemeine Verlauf des Potentialgefälles mit der Höhe, soweit er durch Messungen im Freiballon festgestellt ist, zeigt also eine Abnahme des Potentialgefälles mit der Höhe, entsprechend positiven Ladungen der Luft. Diese positiven Ladungen sind am stärksten in den untersten Luftschichten; sie sind hier auch den größten Schwankungen unterworfen. Die Ladungsdichte nimmt dann in mittleren Höhen schnell ab, um in größeren Höhen auf sehr kleine Beträge zu sinken. Setzt man, um eine Schätzung zu gewinnen, die Abnahme des Gefälles in den untersten 1000 m auf 0,1 Volt/m für die Erhebung von 1 m an, so ergibt sich für diese Schicht eine positive Ladungsdichte von $2{,}7 . 10^{-9}$ absoluter Einheiten oder $2{,}7 . 10^{-3}$ elektrostatischen Einheiten im cbm. Dieser Wert hat nur die Bedeutung eines mittleren Wertes; tatsächlich dürfte die Ladungsdichte nach unten hin merklich größere Werte annehmen.

Darauf deuten auch neuere Untersuchungen (Daunderer), bei denen das Gefälle mittels dreier Kollektoren in 0,1 und 2 m über dem Erdboden ge-

messen wurde. Hier zeigten sich sowohl Zunahmen als auch Abnahmen des Potentialgefälles mit der Höhe, die auf das 30 bis 50fache des oben genannten mittleren Wertes für die untersten 1000 m führen würden. Theoretisch wäre ein starkes Ansteigen der räumlichen Ladungsdichte in der unmittelbaren Nachbarschaft der Elektrode (des Erdbodens) wohl zu erwarten (E. v. Schweidler), wenn man es mit einem ruhenden Gase zu tun hätte; da die Atmosphäre aber gerade in den dem Erdboden unmittelbar anliegenden Schichten kräftiger Durchmischung ausgesetzt ist, wird vermutet werden können, daß derart extreme Werte der Ladungsdichte nicht die Regel bilden. Es wird noch ausgedehnter Untersuchungen auch nach der methodischen Seite hin bedürfen, bis über den Verlauf des Potentialgefälles in den untersten Schichten die wegen ihrer Wichtigkeit für das Problem des Elektrizitätshaushalts der Erde wünschenswerte sichere Aufklärung erreicht ist.

Auf den Zusammenhang des Verlaufes des Potentialgefälles in der freien Atmosphäre mit der Leitfähigkeit wird weiter unten (vgl. unter 11) noch näher eingegangen werden.

II. Die elektrische Leitfähigkeit der Atmosphäre. 7. Allgemeines. Ionenhypothese (vgl. den Artikel „Elektrizitätsleitung in Gasen"). Daß die atmosphärische Luft ein merkliches Leitvermögen für Elektrizität besitzt, wurde schon von Coulomb bemerkt, dem es gelang, den Ladungsverlust eines isolierten, der Luft ausgesetzten Leiters experimentell in zwei Teile zu sondern: den über die isolierenden Stützen abfließenden und den durch die Luft abfließenden Verlust. Für den letzten fand er das nach ihm benannte Gesetz der Elektrizitätszerstreuung, welches aussagt, daß der in jedem Zeitelement erfolgende Ladungsverlust (Kapazität mal Potentialabnahme) proportional dem zurzeit vorhandenen Potential des Körpers sei. Spätere Untersuchungen zeigten, daß in kleinen Lufträumen das Coulombsche Gesetz nicht mehr gilt, daß hier vielmehr der Ladungsverlust unabhängig von der vorhandenen Potentialdifferenz wird. Den Mechanismus des Elektrizitätstransportes durch die Luft dachte man sich nach Art des elektrischen Kugeltanzes, bewirkt durch Luftmoleküle, Staub- und Wasserteilchen, die von den geladenen Elektroden wechselweise angezogen, aufgeladen und abgestoßen würden.

Die ersten Versuche über Elektrizitätszerstreuung in der Atmosphäre rühren von Linss her, der bei einem der Luft ausgesetzten Körper einen etwa 1 prozentige Ladungsverlust in der Minute und einen jährlichen Gang der Zerstreuung auffand. Mit den Arbeiten von Elster und Geitel beginnt die neuere Entwickelung dieses Zweiges der luftelektrischen Forschung. Ihnen gelang es nach wesentlicher Verbesserung des Instrumentariums zu zeigen, daß die Elektrizitätsleitung der Atmosphäre durchaus nach Gesetzen erfolgt, die von der Ionenhypothese gefordert werden. Nach dieser Hypothese erfolgt die Leitung der Elektrizität durch Gase auf atomistischer Grundlage, indem die Ionen, Komplexe von Gasmolekülen, welche mit einem positiven oder negativen Elementarquantum der Elektrizität behaftet sind und im Gase unter Energieaufwand erzeugt werden, unter der Wirkung des elektrischen Feldes eine im wesentlichen gerichtete, aber durch Zusammenstöße mit den Gasmolekülen nach den Prinzipien der kinetischen Gastheorie modifizierte Bewegung durch das Gas ausführen, wobei sie entweder durch Molisierung (Neutralisation durch ein ungleichnamiges Ion) oder durch Abgabe der Ladung an die Elektrode verschwinden.

8. Methoden und Instrumentarium zur Untersuchung der Elektrizitätsleitung der Atmosphäre. Der bei weitem größte Teil der Messungen, die zur Untersuchung der Leitfähigkeit der Atmosphäre bisher angestellt sind, ist mit dem Elster-Geitelschen Zerstreuungsapparat vorgenommen worden. Obgleich der Apparat nicht vollkommen einwandfreie quantitative Daten ergibt, muß er doch hier ausführlich beschrieben werden, da er von prinzipieller Wichtigkeit ist und wegen der Bequemlichkeit der Handhabung voraussichtlich noch lange von den Beobachtern vor anderen Instrumenten bevorzugt werden dürfte.

Der Zerstreuungsapparat besteht aus einem Exnerschen Elektrometer mit im Innern des Gehäuses angebrachter Bernsteinisolation, auf dessen Blättchenträger mittels eines unten konisch zugespitzten Stiftes ein vertikaler Zylinder aus geschwärztem Messingblech von 9 cm Länge und 5 cm Durchmesser aufgesteckt werden kann. Dieser — der „Zerstreuungskörper" — wird von einem ebenfalls aus geschwärztem Messingblech verfertigten Schutzzylinder von 14 cm Höhe und 19 cm Weite umgeben, der oben durch einen Deckel verschlossen ist, unten aber geöffnet bleibt. Man ladet das isolierte System mittels einer Zambonisäule auf das Potential V_1, wartet eine Zeit t (gewöhnlich 15 Minuten), bis das Potential um einen meßbaren Betrag bis auf V_2 abgenommen hat und ermittelt bei abgenommenem Zerstreuungskörper die entsprechenden Werte V_1' t' V_2' zur Bestimmung des Ladungsverlustes über die isolierende Stütze und durch die Luft im Gehäuse des Elektrometers, dann gilt nach Elster und Geitel

$$a = \frac{1}{1-n}\left\{\frac{1}{t} \log \frac{V_1}{V_2} - \frac{n}{t'} \log \frac{V_1'}{V_2'}\right\}$$

worin a den sogenannten „Zerstreuungskoeffizienten" oder kurz „die Zerstreuung"

(in Prozenten der Anfangsladung pro Minute), n das Verhältnis der Kapazität des Elektrometers allein zu der Gesamtkapazität des Zerstreuungssystems bezeichnet. Von einigen Beobachtern ist der Zerstreuungsapparat teils mit einem Schutzzylinder aus Drahtnetz, teils überhaupt ohne Schutzzylinder verwendet worden. Derartig modifizierte Anordnungen lassen sich in ihren Resultaten nur schwer mit denen der ursprünglichen Einrichtung vergleichen. Neuerdings hat E. von Schweidler gezeigt, daß der Zerstreuungsapparat ohne Schutzzylinder, wenn er nur an einem gegen das elektrische Feld der Erde geschützten, der Luftbewegung frei zugänglichen Orte benutzt wird, sehr wohl ein relatives Maß für die Leitfähigkeit der Luft ergibt (Genauigkeit 5 bis 10%).

Dagegen ist der Zerstreuungsapparat in seiner ursprünglichen Form wenig geeignet, vergleichbare Resultate zu liefern, da seine Wirkung in schwer definierbarer Weise von der Luftbewegung abhängt. Das Verhalten des Zerstreuungsapparates mit aufgesetztem Schutzzylinder ist insbesondere durch H. Scherings Untersuchungen aufgeklärt worden; danach ist in Luft von normaler (natürlicher) spezifischer Ionenzahl (Zahl der Ionen pro ccm) innerhalb des vom Zerstreuungskörper ausgehenden Kraftfeldes merklich Sättigungsstrom vorhanden, d. h. die Stromstärke durch das Gas ist unabhängig von der an der Gasstrecke liegenden Potentialdifferenz. Es ist also das oben angeführte logarithmische Gesetz der Elektrizitätszerstreuung hier nicht anwendbar, der Strom ist nicht proportional der Spannung, sondern hängt nur ab von der Anzahl der Ionen, die in der Zeiteinheit und Volumeneinheit innerhalb des Kraftfeldes erzeugt werden (Ionisierungsstärke) und der Anzahl derjenigen Ionen, die durch die untere Oeffnung des Schutzzylinders hinzugeführt werden, deren Zahl also durch die Luftbewegung in der Nähe des Apparates mit bestimmt wird. Aehnliches gilt für den Zerstreuungsapparat mit Schutzzylinder aus Drahtnetz.

H. Schering hat das Prinzip des Zerstreuungsapparates einer Anordnung zugrunde gelegt, die gestattet, eine quantitative Leitfähigkeitsmessung vorzunehmen; sie besteht aus einer isoliert aufgehängten Kugel von 5 cm Radius, die durch ein großes Schutznetz gegen das Erdfeld geschützt ist. Sie befindet sich in hinreichendem Abstand von allen geerdeten Leitern und ist nur durch einen äußerst feinen Draht mit dem Elektrometer verbunden. Es wird so wesentlich ungesättigte Strömung in dem Felde der Kugel erreicht. Für diesen sowie für den allgemeineren Fall eines beliebig gestalteten Leiters, der die Stromlinien der vorbeiströmenden Luft nicht merklich stört, ist die Theorie von E. Riecke gegeben worden. Für den Fall dieses vollkommenen Zerstreuungsapparates ergibt sich Unabhängigkeit der Angaben von der Luftgeschwindigkeit in der Nachbarschaft des Zerstreuungskörpers.

Eine ähnliche Anordnung eignet sich, wie H. Schering gezeigt hat, zur Registrierung der Leitfähigkeit. Unter Verwendung des Benndorfschen Elektrometers sind Registrierungen der Zerstreuung von A. Sprung und G. Lüdeling vorgenommen worden.

Eine andere Anordnung zur Messung der spezifischen Leitfähigkeit der Luft ist von H. Gerdien angegeben worden. Sie besteht aus einem Zylinderkondensator (Länge der inneren Elektrode 24 cm, Durchmesser 1,44 cm, Durchmesser der äußeren Elektrode 16 cm), durch welchen mittels eines von Hand angetriebenen vierflügeligen Fächeraspirators ein Luftstrom hindurchgesaugt wird. Die äußere Elektrode sitzt auf dem Blättchenträger eines Exner-Elster-Geitelschen Elektrometers; es ist dafür gesorgt, daß die Luftgeschwindigkeit innerhalb des Zylinderkondensators gleichförmig verläuft. Man ladet das isolierte System auf ein Anfangspotential V_1, aspiriert eine gemessene Zeit t, bis eine gut meßbare Abnahme der Spannung eingetreten ist, und liest die Endspannung V_2 ab. Der Versuch wird mit dem entgegengesetzten Vorzeichen der Ladung wiederholt. Hat man bei dem ersten Versuch negative Ladung verwendet, so ergibt die Messung unmittelbar λ_p, den Anteil der positiven Ionen an der Leitfähigkeit:

$$\lambda_p = \varepsilon . n_p v_p = \frac{\lg V_1 - \lg V_2}{t} \cdot \frac{C \lg \left(\frac{r_a}{r_i}\right)}{2\pi l}$$

der zweite Versuch ergibt unmittelbar λ_n. Darin bedeuten ε die Ladung eines Ions, n_p die spezifische Zahl der positiven Ionen, v_p ihre spezifische Geschwindigkeit (Geschwindigkeit unter der Wirkung der Einheit des elektrischen Feldes), C die Kapazität des isolierten Systems r_a, r_i den Radius der äußeren oder inneren Elektrode, l die Länge der inneren Elektrode. Sorgt man dafür, daß die Geschwindigkeit des Luftstromes G oberhalb einer gewissen Grenze bleibt, die gegeben ist durch

$$G > \frac{v_{max} V_1 l}{\lg \left(\frac{r_a}{r_i}\right) . (r_a^2 - r_i^2)}$$

worin v_{max} die maximale unter den verschiedenen Ionenarten vorkommende spezifische Geschwindigkeit bedeutet, so gibt der Apparat die Leitfähigkeit der Luft in absolutem Maße ohne Kenntnis der Luftgeschwindigkeit. Jede Messung erfordert nur wenige Minuten.

Wählt man die Dimensionen des Zylinderkondensators in einem anderen Verhältnis zur Geschwindigkeit der durchgesaugten Luft,

so daß die Geschwindigkeit den oben angegebenen Grenzwert unterschreitet, so erhält man das Prinzip des von H. Ebert angegebenen Aspirationsapparates zur Messung der spezifischen Ionenzahl (Ionenzähler). Der Apparat besteht aus einem verhältnismäßig langen und engen Zylinderkondensator, durch den mittels eines kleinen Laufwerkaspirators ein schwacher Luftstrom gesaugt wird. Das gesamte während einer Messung hindurchgesaugte Luftquantum kann aus der Umdrehungszahl des Aspirators angegeben werden. Bezeichnet wieder V_1 das Anfangs-, V_2 das Endpotential in Volt, F die Fördermenge in ccm, C die Kapazität, so gilt:

$$\varepsilon . n_p = \frac{C.(V_1 - V_2)}{F.300}$$

und ein entsprechender Ausdruck für $\varepsilon . n_n$. Aus dem bekannten Wert der Ionenladung $\varepsilon = 4{,}7 . 10^{-10}$ elektrostatischen Einheiten kann dann die spezifische Ionenzahl berechnet werden. Gewöhnlich begnügt man sich mit der Angabe des sogenannten „Ionengehalts“ εn_p oder εn_n in elektrostatischen Einheiten pro cbm.

Für die Messung der spezifischen Ionengeschwindigkeit sind eine Reihe verschiedener Anordnungen verwendet worden. Nach H. Gerdien kann man entweder gleichzeitig mit dem Apparat zur Messung der Leitfähigkeit $\varepsilon . n . v$ und mit dem Ionenzähler $\varepsilon . n$, somit aus dem Quotienten beider Werte v bestimmen, oder man benutzt zwei hintereinander geschaltete Zylinderkondensatoren, von denen der erste nur einen Bruchteil der in der Luft enthaltenen Ionen abfängt, während der zweite den Rest entzieht. Die gesamte, an beiden Zylinderkondensatoren neutralisierte Ladung ergibt wieder $\varepsilon . n$, die Spannungserniedrigung an dem ersten Kondensator $\varepsilon . n . v$. Eine ähnliche Methode ist von H. Mache angegeben worden; es wird einmal mit dem Ionenzähler allein und dann nach Vorstecken eines zweiten Zylinderkondensators gemessen zwischen dessen Elektroden mittels einer kleinen Batterie eine Spannungsdifferenz unterhalten wird, die nicht hinreicht, um dem Luftstrom alle Ionen zu entziehen. Aus beiden Messungen läßt sich ebenfalls v angeben.

9. Beobachtungsmaterial über Leitfähigkeit, Ionenzahl, Ionengeschwindigkeit. Da ein großer Teil der auf die Untersuchung der Leitfähigkeit, der Ionenzahl und Ionengeschwindigkeit bezüglichen Arbeiten mittels des Z rstreuungsapparates in seiner ursprünglichen Form ausgeführt worden ist, lassen sich die Resultate dieser Beobachtungen weder quantitativ verwerten noch unmittelbar zum Vergleich mit dem Material heranziehen, das nach den übrigen Methoden erhalten wurde. Die nach Schering, v. Schweidler und mittels der Aspirationsmethoden erhaltenen Resultate sind quantitativ verwertbar, bilden aber nur einen kleinen Teil des gesamten Beobachtungsmaterials, so daß vorläufig auf die nach der ursprünglichen Zerstreuungsmethode erhaltenen Daten nicht verzichtet werden kann.

Die Zerstreuungsmessungen geben für den Ladungsverlust des Zerstreuungskörpers im allgemeinen Werte von der Ordnung 1% pro Minute, die gelegentlich bis auf 5% anwachsen können; bei Nebel sinken sie bis auf kleine Bruchteile eines Prozents. Der Quotient der mit negativer oder positiver Ladung des Zerstreuungskörpers beobachteten Koeffizienten $\frac{a-}{a+} = q$ ist vielfach zur Diskussion herangezogen worden; er gibt ein angenähertes Maß für das Ueberwiegen der positiven leichtbeweglichen Ionen über die negativen. Dieser Quotient ist gewöhnlich > 1; seine größten Werte erreicht er bei Messungen auf Bergspitzen, wo durch die Wirkung des elektrischen Feldes der Erde besonders starke Anreicherung an positiven Ionen statthat. Auch die mittels des Ionenzählers gemessenen Ionengehalte zeigen eine entsprechende Unipolarität, ihre Beträge schwanken um etwa 0,3 elektrostatische Einheiten/cbm, d. h. rund 600 Ionen jedes Vorzeichens im ccm. Sie zeigen eine Unipolarität im Sinne eines Ueberschusses an positiven Ionen, die nicht im Einklang steht mit dem Ueberschuß an positiver räumlicher Ladungsdichte, wie er aus der Abnahme des Potentialgefälles mit der Höhe zu erwarten wäre. Der hier erkennbare Widerspruch scheint seiner Aufklärung durch eine zuerst von Langevin gemachte Beobachtung näher gebracht zu werden, der in der Atmosphäre neben den Ionen von großer spezifischer Geschwindigkeit solche von erheblich geringerer (etwa $^1/_{1000}$) in merklicher Zahl nachweisen konnte, die bei den Versuchsbedingungen des Ebertschen Ionenzählers sich der Messung entziehen müssen. Es ist nicht unwahrscheinlich, daß der zu große Ueberschuß an leichtbeweglichen Ionen gerade durch einen gleichzeitig vo handenen Ueberschuß von schwerbeweglichen Ionen so weit kompensiert sind, daß der restierende Betrag an positiver räumlicher Ladungsdichte sich in Uebereinstimmung befindet mit dem aus der Abnahme des Potentialgefälles mit der Höhe berechneten. Das Beobachtungsmaterial über die spezifische Zahl der leichtbeweglichen und insbesondere der schwerbeweglichen Ionen ist zurzeit noch äußerst dürftig, so daß sich mit einiger Sicherheit über ihre gegenseitigen Beziehun-

gen und Zusammenhänge mit der aus Potentialgefällemessungen erschlossenen räumlichen Ladungsdichte nichts aussagen läßt.

Die in der Atmosphäre gemessenen spezifischen Geschwindigkeiten sind ihrer Natur nach als Mittelwerte aus sehr veränderlichen Anteilen der leicht- und schwerbeweglichen Ionen sowie nach der methodischen Seite hin mit erheblicher Unsicherheit behaftet. Sie dürften sämtlich zu groß gefunden sein, da bei den zur Messung der spezifischen Geschwindigkeit vorgenommenen Ionenzählungen die schwerbeweglichen Ionen größtenteils nicht mitgezählt wurden. Die am Erdboden beobachteten Werte schwanken um 1 cm/sec pro Volt/cm. Die spezifischen Geschwindigkeiten der negativen Ionen werden gewöhnlich — im Einklange mit Laboratoriumsmessungen in Luft — größer gefunden als die der positiven Ionen. Jene werden leichter durch alle die Lufttrübung steigernden Ursachen herabgedrückt als diese. In größeren Höhen nehmen beide entsprechend der geringeren Dichte der Luft zu (H. Gerdien).

Die Messungen der spezifischen Leitfähigkeit sowohl nach der Methode von Schering als auch die zurzeit schon zahlreicher vorliegenden absoluten Messungen nach H. Gerdien zeigen übereinstimmend sehr nahe Gleichheit der Anteile der positiven und der negativen Ionen an der Leitfähigkeit. Obgleich das Beobachtungsmaterial an absoluten Werten zurzeit noch klein ist, verteilen sich die Messungen bereits auf den europäischen Kontinent, die Arktis und Antarktis, die Tropen, den Atlantischen und Stillen Ozean. Die Absolutwerte der Leitfähigkeit ($\lambda = \lambda n + \lambda n$) zeigen gute Uebereinstimmung und bewegen sich um etwa 2.10^{-4} elektrostatische Einheiten (d. h. etwa 3.10^{-16} von dem Leitvermögen verdünnter Schwefelsäure maximaler Leitfähigkeit).

10. Jährlicher und täglicher Gang der Leitfähigkeit. Die Leitfähigkeit und der Ionengehalt (an leichtbeweglichen Ionen) zeigen einen deutlichen jährlichen Gang mit einem flachen Maximum im Sommer und einem gut ausgeprägten Minimum im Winter. Dieser Gang ist also genau der entgegengesetzte zu dem des Potentialgefälles.

Der tägliche Gang ist weit schlechter bekannt, da meist die Beobachtungen aus den Nachtstunden fehlen. Er ist von lokalen Einflüssen abhängig und zeigt auch an einer Beobachtungsstation Schwankungen mit der Jahreszeit. Es ist eine doppelte tägliche Periode vorhanden mit einem entsprechend den lokalen Einflüssen mehr oder weniger deutlichen Hauptmaximum in den Mittagsstunden, einem sekundären Maximum in der Nacht oder in den frühen Morgenstunden, Minimum gegen Sonnenaufgang und Sonnenuntergang. Es scheint also auch der tägliche Gang der Leitfähigkeit einen zu dem des Potentialgefälles spiegelbildlichen Verlauf aufzuweisen. Dagegen sind die einzelnen zeitlichen Aenderungen der Leitfähigkeit durchaus nicht immer mit entgegengesetzten Schwankungen des Potentialgefälles verknüpft — die erwähnten regelmäßigen Verläufe ergeben sich vielmehr erst bei der Zusammenfassung einer größeren Zahl von Daten zu Mittelwerten.

11. Die Abhängigkeit der Leitfähigkeit von meteorologischen Elementen. Für den Zusammenhang der Leitfähigkeit mit den meteorologischen Elementen gilt im wesentlichen das gleiche, wie für die Abhängigkeit des Potentialgefälles — es lassen sich auf Grund der Ionenhypothese in einigen Fällen Vermutungen über unmittelbare Abhängigkeit aussprechen, in anderen Fällen wird man geneigt sein, mittelbaren Einfluß des betreffenden Elementes anzunehmen. Die Zusammenhänge treten bei der Leitfähigkeit im allgemeinen deutlicher hervor als bei dem Potentialgefälle; der Grund dafür ist wohl darin zu erkennen, daß das Potentialgefälle nicht ausschließlich durch den am Beobachtungsort am Erdboden herrschenden Zustand der Atmosphäre, sondern auch durch die Verhältnisse in der Höhe beeinflußt wird, was bei der Leitfähigkeit weit weniger zutrifft, da sie in erster Linie durch die an Ort und Stelle geltenden meteorologischen Daten bestimmt wird.

Die spezifische Leitfähigkeit der Luft wird in hohem Maße durch die Zahl der in der Luft vorhandenen Staub- und Dunstteilchen beeinflußt, sie nimmt also ab mit zunehmender Lufttrübung. So sinkt die Leitfähigkeit z. B. bei nebeligem Wetter, wenn die Luft von einer großen Zahl als Adsorptionskerne dienender Tröpfchen erfüllt ist, zu außerordentlich kleinen Werten herab; an klaren Tagen mit guter Fernsicht sind dagegen hohe Werte der Leitfähigkeit anzutreffen.

Die Entdeckung dieses Zusammenhanges durch Elster und Geitel hat wesentlich dazu beigetragen, der Ionenhypothese ihren Platz als leitende Arbeitshypothese in der neueren luftelektrischen Forschung zu sichern.

Die Wirkung der Lufttrübung, also der Zahl der Adsorptionskerne auf die Leitfähigkeit der Luft ist, wie vor allem die Versuche von A. S. Eve dargetan haben, so zu verstehen, daß die ursprünglich in der Luft erzeugten leichtbeweglichen Ionen in mit wachsender Lufttrübung steigendem Maße durch schwerere Aggregate, wie Staubkerne, kleinste Wassertröpfchen, gebunden werden.

Es ändert sich durch die Adsorption der leichtbeweglichen Ionen also nicht die spezifische Ionenzahl, wohl aber die spezifische Geschwindigkeit, deren Mittelwert durch fortschreitende Ueberführung von leichtbeweglichen Ionen in die Zahl der schwerbeweglichen Ionen sinkt.

Deutlicher als die absolute Höhe des Luftdruckes sollten dessen Aenderungen die Geschwindigkeit beeinflussen. Das wäre insofern zu erwarten, als bei sinkendem Luftdruck radioaktive Emanationen (vgl. unter 13) aus dem Erdboden in die Atmosphäre dringen und diese stärker ionisieren müssen. Das Phänomen scheint durch andere, ebenfalls mit sinkendem Luftdruck wirksam werdende Faktoren überdeckt zu werden, denn das Beobachtungsmaterial läßt es in der freien Atmosphäre nur schwach ausgeprägt erkennen. Dagegen ist es in Hohlräumen, die mit dem Erdboden in Verbindung stehen (Keller, Höhlen) je nach dem Gehalt des Erdbodens an radioaktiven Stoffen (vgl. unter 13) mehr oder minder deutlich wahrnehmbar. Mit zyklonaler Wetterlage ist, sofern nicht Niederschläge eine Störung bedingen, wegen der höheren Luftreinheit größere Leitfähigkeit verbunden, als mit antizyklonaler Wetterlage, die mit ihren dunstigen Stabilitätsschichten die Leitfähigkeit herabsetzt. Gewisse lokale absteigende Luftströme, sogenannte Fallwinde (Föhn) pflegen die Leitfähigkeit zu erhöhen, was vermutlich ihrer geringen Lufttrübung zuzuschreiben ist.

Der Einfluß der Lufttemperatur auf die Leitfähigkeit, der nach dem jährlichen Gange der Leitfähigkeit vermutet werden kann, wird durch die Resultate der Beobachtungen bestätigt. Mit wachsender Temperatur nimmt die Leitfähigkeit zu und zwar infolge Zunahme der spezifischen Ionenzahlen. Inwiefern der Einfluß der Lufttemperatur auf die Leitfähigkeit als ein unmittelbarer oder mehr mittelbarer anzusehen ist, läßt sich nicht leicht entscheiden; vermutlich sind in ihm die Wirkungen wachsender Sonnenstrahlung und Bodentemperatur mit enthalten. Beide meteorologischen Elemente müßten in ähnlichem Sinne wie die Luftdruckabnahme das Heraustreten emanationshaltiger Bodenluft aus den Erdbodenkapillaren befördern, also im Sinne einer größeren Ionisierungsstärke wirken. Die Intensität der Sonnenstrahlung, insbesondere diejenige im Ultravioletten ist weitgehend abhängig von der Lufttrübung und dürfte schon aus diesem Grunde einen deutlichen Parallelismus mit der Leitfähigkeit aufweisen. Eine unmittelbare Steigerung der Ionisierungsstärke durch die am Erdboden nachweisbare ultraviolette Strahlung ist dagegen nicht anzunehmen, da die in Luft stark absorbierbaren und daher direkt ionisierend wirksamen kurzwelligen ultravioletten Strahlen bereits in relativ großen Höhen der Atmosphäre herausfiltriert werden müssen.

In vielen Fällen, aber durchaus nicht regelmäßig, nimmt die Leitfähigkeit mit der absoluten Feuchtigkeit der Luft zu. Vermutlich liegt aber hier keine neue Beziehung vor, sondern nur die der Lufttemperatur zur Leitfähigkeit; da im allgemeinen die absolute Feuchtigkeit (der Dampfdruck) mit der Lufttemperatur wächst, sind die beiden Einflüsse schwer zu trennen.

Mit wachsender relativer Feuchtigkeit nimmt die Leitfähigkeit besonders bei hohen Feuchtigkeitsgraden stark ab. Wahrscheinlich handelt es sich hier um eine Verminderung der spezifischen Ionengeschwindigkeiten, die schon merklich unterhalb der Sättigung von der wachsenden relativen Feuchtigkeit herabgesetzt werden.

Wachsende Bewölkung scheint bis zu mittleren Graden, insbesondere bei Cumulusbildung, die Leitfähigkeit zu erhöhen. Da, wo abnehmende Bewölkung im wesentlichen eine Steigerung der Lufttemperatur bewirkt, ist eine Zunahme der Leitfähigkeit mit abnehmender Bewölkung zu beobachten.

Ein Einfluß der Windrichtung ist je nach den lokalen Umständen der betreffenden Station zu erwarten. So müssen bei ungleichmäßiger Verteilung der radioaktiven Ionisatoren gewisse Windrichtungen mit höherer Leitfähigkeit verknüpft sein. Aehnliche Einflüsse kommen z. B. bei an der Küste gelegenen Stationen zur Geltung, wo die verschiedenen Windrichtungen im allgemeinen mit einem verschiedenen Grade der Lufttrübung parallel gehen. Auch durch den Zusammenhang der Windrichtung mit der Wetterlage dürfte ein Zusammenhang der ersteren mit der Leitfähigkeit gegeben sein.

Der Einfluß der Windgeschwindigkeit auf die Leitfähigkeit, soweit er aus Zerstreuungsmessungen nach der ursprünglichen Methode erschlossen werden soll, ist unsicher wegen der methodischen Abhängigkeit dieser Beobachtungsmethode von der Geschwindigkeit der Luftbewegung.

Nach Zölss schwankt in Kremsmünster die Leitfähigkeit (aus Zerstreuungsmessungen geschätzt) parallel mit den Schwankungen der erdmagnetischen Deklination.

Ordnet man die beobachteten Werte der Leitfähigkeit nach gleichzeitig gemessenen Werten des Potentialgefälles, so ergibt sich, wie schon der tägliche und noch mehr der jährliche Verlauf dieser beiden Elemente erkennen läßt, ein deutlicher Zusammenhang. Große Werte des Potentialgefälles entsprechen kleinen Werten der Leitfähigkeit und umgekehrt. Auf diese Beziehung wird weiter unten bei Besprechung des vertikalen Leitungsstromes noch näher eingegangen werden.

12. Die elektrische Leitfähigkeit in höheren Schichten der Atmosphäre. Die bei der Messung des Potentialgefälles im Freiballon erörterten Fehlerquellen kommen auch für Beobachtungen

der Leitfähigkeit in Betracht. Sie wirken hier nicht allein durch Erzeugung von Eigenladung und Influenzladung am Ballon, insofern durch das Vorhandensein solcher Ladungen eine künstliche Anreicherung der einen oder anderen Ionenart herbeigeführt werden kann, sondern auch durch Verminderung des natürlichen Ionengehalts, insofern beim Auswerfen feinen Ballastsandes Ionenadsorption an diesem stattfinden kann. Es müssen also die älteren Zerstreuungs- und Ionengehaltsmessungen im Ballon, bei denen noch nicht auf diese Hauptfehlerquellen Rücksicht genommen wurde, für quantitative Betrachtungen ausgeschlossen werden.

Daneben besitzen wir ein auch nach der quantitativen Seite hin verwertbares Material in den absoluten Leitfähigkeitsmessungen, die mittels des Aspirationsapparates im Freiballon gewonnen wurden (H. Gerdien).

Schon die Zerstreuungsbeobachtungen ließen im wesentlichen den Verlauf der Leitfähigkeit erkennen, der später nach der absoluten Methode genauer untersucht wurde. In den untersten 3000 m Höhe wechselt die Leitfähigkeit in ähnlich unregelmäßiger Weise wie das Potentialgefälle. Die Leitfähigkeit zeigt sich in diesen Schichten im wesentlichen bestimmt durch den Grad der Lufttrübung; sie behält innerhalb dieser Höhenlage etwa die Größenordnung bei, die auch am Boden anzutreffen ist. Wie die mittels des Ionenzählers angestellten Beobachtungen ergeben haben, ist die Herabminderung der Leitfähigkeit durch die vorhandenen Adsorptionskerne unmittelbar bewirkt durch die Zahl der leichtbeweglichen Ionen, die durch Anlagerung an Staubteilchen und Wassertröpfchen gebunden werden. Oberhalb von etwa 3000 m Höhe, wo die Grenze des die unteren Schichten erfüllenden Staub- und Dunstmeeres liegt, wächst dann die Leitfähigkeit mit sinkendem Grade der Lufttrübung.

Dabei scheint die spezifische Zahl der leichtbeweglichen Ionen nur unmittelbar nach Ueberschreiten der Dunstschichten und Wolkendecken stark zuzunehmen; in größeren Höhen — die Beobachtungen erstrecken sich jetzt bis zu etwa 7000 m — scheint die Ionenzahl dann nur noch langsam zu wachsen. Quantitativ ist der Verlauf des Gehalts an leichtbeweglichen Ionen mit der Höhe etwa folgender: am Erdboden und bis zu etwa 3000 m Höhe rund 0,3 elektrostatische Einheiten pro cbm, oberhalb der stark getrübten Luftschichten steigt dann der Ionengehalt auf etwa 0,5 und weiterhin bis zu einer elektrostatischen Einheit pro cbm. Im einzelnen Falle ist der hier gegebene Verlauf durch die besonderen meteorologischen Verhältnisse modifiziert.

Die Mittelwerte der spezifischen Ionengeschwindigkeit nehmen im allgemeinen mit der Höhe entsprechend der abnehmenden Dichte der Luft zu; sie wachsen also in der Höhe von etwa 5500 m, wo der halbe Atmosphärendruck herrscht, auf etwa das Doppelte der am Boden beobachteten Werte an.

Lokale Verminderung der spezifischen Ionengeschwindigkeit insbesondere der negativen Ionen kommt in Gebieten vor, die nahezu mit Wasserdampf gesättigt sind, z. B. in der Nachbarschaft von Kumuluswolken. In Wolkenschichten zeigt sich eine deutliche Beeinflussung des Gehalts an leichtbeweglichen Ionen und damit auch der Leitfähigkeit; der Ionengehalt kann hier auf etwa $^1/_{20}$ elektrostatische Einheit pro cbm herabgedrückt werden.

Wie aus dem Verlauf der spezifischen Zahlen und spezifischen Geschwindigkeiten der Ionen mit der Höhe im einzelnen zu ersehen ist, wird auch die Leitfähigkeit im allgemeinen stark zunehmen. Das haben auch die direkten Leitfähigkeitsmessungen ergeben. So wurde bei einer Ballonfahrt am 11. Mai 1905 innerhalb eines Hochdruckrückens folgender Verlauf der Leitfähigkeit mit der Höhe gefunden:

In etwa h m Höhe h	λ elektrostatische Einheiten $\lambda.10^4$	
800	0,49	unter Cumuluswolken
1350	1,19	in einer Lücke zwischen Cumuli
2720	11,70	über einer Stratusdecke
3300	7,56	in einer Stabilitätsschicht
etwa 30′ später	8,39	
weitere 20′ später	6 35	
3550	4,24	
4500	6,88	über einer Dunstschicht
5000	7,82	„
5700	13,65	„

Die Leitfähigkeit nimmt bei dieser Fahrt also zwischen 800 m Höhe und der Maximalhöhe von 5700 m von $0,49.10^{-4}$ elektrostatischen Einheiten bis auf etwa den 27fachen Betrag zu.

Dem mag ein Beispiel von einer Fahrt gegenübergestellt werden, die am 30. August 1905 innerhalb eines Tiefdruckgebietes stattfand:

h	$\lambda . 10^4$	
1680	3,54	unter einer Stratocumulusdecke
3200	5,34	darüber
4100	9,36	über einer Schicht Altocumuli
4330	8,69	„
4700	11,59	„
6020	20,6	„

Die Leitfähigkeit nimmt bei dieser Fahrt also zwischen 1680 m Höhe und der Maximalhöhe von 6020 m von $3{,}54 . 10^{-4}$ elektrostatische Einheiten bis auf etwa den 6fachen Betrag zu.

Der Verlauf der beiden Anteile λ_p und λ_n weist, sobald Wolkendecken und Dunstschichten vorhanden sind, oberhalb und unterhalb dieser häufig beträchtliche Unipolarität auf. So überwiegt meist bei normalem Potentialgefälle unterhalb der adsorbierenden Schicht der Anteil der negativen Ionen, oberhalb der Schicht der Anteil der positiven Ionen an der Leitfähigkeit. Die Unipolarität beruht auf dem Unterschiede der spezifischen Ionenzahlen, der dadurch zustande kommt, daß die positiven Ionen im normalen Felde von oben nach unten wandern, also unterhalb der adsorbierenden Schicht in geringerer Zahl vorhanden sein werden als oberhalb der Schicht; entsprechendes gilt für die von unten nach oben wandernden negativen Ionen.

Zuweilen werden auch Abweichungen von dieser Regel beobachtet, die vielleicht dadurch zustande kommen, daß ursprünglich regelmäßig entstandene Ladungsüberschüsse durch Luftströmungen verlagert werden und dabei in neue Anordnungen gebracht werden, die der Regel, die für die Bildung dieser Schichten gilt, nicht mehr entsprechen.

13. Die in der Atmosphäre wirksamen Ionisatoren. Die Atmosphäre hat nach den unter 12 gemachten Ausführungen dauernd eine merkliche Leitfähigkeit, die sie dem Vorhandensein von Jonen in der Luft verdankt. Die Ladung dieser bewegt sich um den Wert von etwa 0,3 elektrostatischen Einheiten/cbm. Die vorhandenen Ionen werden teils durch das elektrische Feld an die Erdoberfläche geführt, teils verschwinden sie durch Vereinigung mit Ionen des entgegengesetzten Vorzeichens. Es muß also, um im stationären Zustande eine merkliche Ionenzahl zu erhalten, eine ionisierende Ursache wirksam sein. Bezeichnen wir mit q die Anzahl der in der Zeit- und Volumeneinheit neu erzeugten Ionenpaare, mit n_p bezw. n_n die spezifischen Ionenzahlen, so gilt, wenn wir von allen Verlusten außer denen durch Wiedervereinigung absehen, die Beziehung

$$\frac{dn}{dt} = q - \alpha\, n_p\, n_n$$

worin α den Koeffizienten der Wiedervereinigung bezeichnet; α hat für reine Luft von 760 mm Druck und Zimmertemperatur etwa den Wert $3400 . \varepsilon$, worin ε die Ionenladung bedeutet. Für den stationären Zustand hält die Ionisierungsquelle gerade der Wirkung der Wiedervereinigung das Gleichgewicht, es gilt

$$q = \alpha\, n_p\, n_n \text{ oder } q = \alpha n^2,$$

für gleiche Zahlen positiver und negativer Ionen in der Volumeneinheit. Für einen stationären Zustand, in dem z. B. 600 positive Ionen pro ccm mit ebensoviel negativen im Gleichgewicht sind, ergibt sich so $q = 3400 . 600 . 600 . 4{,}9 . 10^{-10} = 0{,}6$ pro sec. und ccm.

Der wesentliche Anteil an der zur Unterhaltung der Ionisation in der Luft erforderten Ionisierungsarbeit wird von den radioaktiven Stoffen geleistet, die in der Erde und in der Atmosphäre vorhanden sind. Von den im Erdboden, in Quellen oder im Meerwasser enthaltenen radioaktiven Substanzen, bezüglich deren Vorkommen auf den Artikel „Radioaktivität“ verwiesen werden muß, können unmittelbar nur die in den obersten Schichten des Bodens enthaltenen vermöge ihrer durchdringenden Strahlungen in der Atmosphäre ionisierend wirken. Ein Teil der Ionisierungsenergie, die von den im Erdboden enthaltenen Substanzen an die Atmosphäre abgegeben wird, kommt durch die gasförmigen Umwandlungsprodukte, die radioaktiven Emanationen zur Wirkung. Diese dringen aus den Hohlräumen des Bodens in die Luft teils durch Diffusion, teils bei der Expansion der Bodenluft bei sinkendem Luftdruck. In der Atmosphäre werden sie durch die Luftbewegung verteilt; sie sind hier bis zu beträchtlichen Höhen nachweisbar. Die aus den gasförmigen Umwandlungsprodukten (Radium-, Thorium-, Aktiniumemanation) entstehenden festen Substanzen, die radioaktiven Induktionen werden ebenfalls durch die Luftbewegung in der Atmosphäre verteilt, andererseits wandern sie, da sie zum Teil positive Ladungen tragen, unter der Wirkung des elektrischen Feldes der Atmosphäre unter normalen Umständen an die negative Elektrode, die Erdoberfläche. Hier werden sie niedergeschlagen und wirken zu einem beträchtlichen Teile von hier aus an der Ionisierung der Luft durch ihre durchdringenden Strahlungen mit. Ein Teil der radioaktiven Niederschläge, die sich in der Atmosphäre gebildet haben, gelangt auch mit Niederschlägen zum Erdboden.

So wird es verständlich, daß die von den radioaktiven Substanzen in der Atmosphäre geleistete Ionisierungsarbeit in außerordentlich verwickelter Weise von den meteorologischen Faktoren abhängig sein muß.

Schon der primäre Vorgang des Austritts der Emanation aus dem Boden ist abhängig

von der wechselnden Durchlässigkeit des Erdreichs, die durch Niederschläge (Regen, Schnee), wechselnde Bodentemperatur unter der Wirkung wechselnder Bestrahlung beeinflußt wird. Andererseits hängen die austretenden Emanationsmengen unmittelbar von der Dauer und Größe der Luftdruckerniedrigungen ab, die den normalen Diffusionsvorgang allerdings wohl nicht an Wirkung erreichen.

Sekundär wird die in der Atmosphäre zur Wirkung kommende Ionisierungsarbeit der radioaktiven Substanzen insofern beeinflußt, als die Induktionen durch wechselnde meteorologische Verhältnisse mehr oder weniger schnell von dem Orte ihrer Entstehung in der Atmosphäre zum Erdboden geführt werden. Dieser Vorgang wird durch die Luftbewegung, durch Adsorptionskerne, an welche sich die Träger der Induktionen anlagern, durch Niederschläge, für welche sie teils als Kondensationskerne dienen, teils von diesen mitgerissen werden, durch das elektrische Feld beeinflußt, das sie zur Erdoberfläche zu führen strebt. Nach den verschiedenen Zuständen der Atmosphäre werden so die ionisierenden Wirkungen der Induktionen in außerordentlich mannigfaltiger Weise zur Geltung kommen.

Tertiär wird dann die Ionisierungswirkung der auf der Erdoberfläche niedergeschlagenen Induktionen durch Abschirmen ihrer ionisierenden Strahlung (Schneedecke) beeinflußt werden.

Die oben geschätzte Zahl für die in der Atmosphäre aufzubringende Ionisierungsarbeit, ausgedrückt durch die Zahl der pro Sekunde im ccm neu zu erzeugenden Ionenpaare $q = 0,6$, ist durch direkte Messungen des Gehaltes der Luft an radioaktiven Stoffen zu einem Vergleich mit den von diesen allein erzeugten Ionen herangezogen worden. Da es von prinzipieller Bedeutung für das Problem der Luftelektrizität ist, die Resultate der Messungen kennen zu lernen, die dem Vergleich zugrunde liegen, so soll hier kurz auf sie eingegangen werden.

Die ersten Versuche von Hofmann und Mache gingen darauf aus, die in der Luft enthaltene Emanation durch eine absorbierende Flüssigkeit zu binden, sie dann durch Erwärmen in den Meßapparat hinein zu treiben und hier durch Messung des von ihr unterhaltenen Sättigungsstromes quantitativ zu bestimmen. Sie verwendeten Petroleum, das mittels einer Kältemischung auf -19^0 abgekühlt wurde; bei dieser Temperatur absorbierte es aus der hindurchgeblasenen Luft das etwa 2,5fache Emanationsquantum als bei 17^0.

Nach dem Vorgange von Mache und Rimmer hat Eve gekühlte Holzkohle als absorbierendes Mittel verwendet. Auch wird nach Ebert die Emanation in einem mit flüssiger Luft gekühlten Gefäß kondensiert.

Nach diesen Versuchen kann man die im cbm Luft enthaltene Emanation gleich der Menge Emanation schätzen, die mit 8.10^{-11} g Radium im Gleichgewicht ist und imstande sein würde, einen Sättigungsstrom von $4,2.10^{-5}$ elektrostatischen Einheiten zu unterhalten, entsprechend der Neubildung von rund 0,05 Ionenpaaren im ccm pro Sekunde. Der so erhaltene Wert ist zwar kleiner, aber doch von der gleichen Größenordnung als der zu erklärende Wert $q = 0,6$. Naturgemäß muß der so geschätzte Wert zu klein sein, da er nur den Anteil der Emanation an der Ionisierungsarbeit gibt ohne Rücksicht auf die von den Zerfallsprodukten der Emanation in der Luft und am Erdboden geleisteten Beiträge zur Ionisierungsarbeit.

Auf indirektem Wege hat Eve den Emanationsgehalt der Luft gemessen, indem er die aus der Emanation entstehenden Induktionen innerhalb eines die Luftprobe enthaltenden Gefäßes auf einer negativ geladenen Elektrode niederschlug und den Sättigungsstrom maß, der von diesem Niederschlag unterhalten wurde. Ein Vergleichsversuch mit Luft von bekanntem Emanationsgehalt ergab dann die in der Volumeneinheit der freien Atmosphäre enthaltene Emanationsmenge.

Die in der Luft enthaltenen radioaktiven Induktionen sind in ähnlicher Weise der Messung zugänglich. Die ersten Versuche von Elster und Geitel, welche einen auf hohe negative Spannung geladenen Draht der freien Luft exponierten und dann den Sättigungsstrom bestimmten, der von den radioaktiven Niederschlägen auf dem Draht erzeugt wurde, konnten nur qualitativ brauchbare Resultate ergeben, da bei der Unbestimmtheit der Versuchsbedingungen nicht angegeben werden kann, aus welchem Volumen Luft die auf dem Draht niedergeschlagenen Induktionen stammen.

Quantitative Messungen der Zahl und spezifischen Geschwindigkeit der positiv geladenen Träger der radioaktiven Induktionen hat H. Gerdien ausgeführt. Ein mittels Anemometers gemessener Luftstrom wurde durch einen Zylinderkondensator hindurchgesaugt, dessen innere negativ geladene Elektrode mit einem Papierrohr überzogen war. Nach beendeter Exposition wurde das Papierrohr, auf dessen Oberfläche sich die geladenen Induktionsträger niedergeschlagen hatten, in gleichlange Teile zerschnitten, die einzeln untersucht wurden. Durch längere Zeit nach dem Ende der Exposition fortgesetzte Vergleichsmessungen kann man die Intensität der ionisierenden Strahlung für jedes Intervall und ferner den zeitlichen Verlauf der bei jedem Intervall wirksamen Strahlung feststellen. Aus dem zeitlichen Verlauf läßt sich der Anteil der Radium- und der Thoriuminduktionen trennen, aus der räumlichen Verteilung der Intensität auf die verschiedenen Intervalle läßt sich die auf

bestimmte Bereiche der spezifischen Geschwindigkeit entfallende Zahl der Induktionsträger bestimmen. Es ergab sich so, daß unter den Trägern der Radium- und Thoriumaktivität solche von der spezifischen Geschwindigkeit der leichtbeweglichen Ionen vorkommen. Daneben gibt es auch Träger von erheblich geringeren spezifischen Geschwindigkeiten bis herab zu solchen, die etwa den schwerbeweglichen Langevin-Ionen entsprechen. Die von den Radiuminduktionen im ccm und in der Sekunde erzeugten Ionenpaare schwankten um Beträge von etwa 1,0; das Maximum der Ionisierungsarbeit entfiel auf die leichtbeweglichen Träger, deren spezifische Geschwindigkeit zwischen etwa 0,6 und 1,8 cm/sec. pro Volt/cm lag. Für die Träger der Thorinduktionen ergaben sich stets weit kleinere Anteile an der Ionisierungsarbeit (in Göttingen) als für die Radiuminduktionen; sie lagen zwischen 0,25 und 0,1 der für diese gefundenen Werte. Der weit geringere Anteil der Thorinduktionen wird verständlich durch die gegenüber der Radiumemanation sehr kleine Lebensdauer der Thoremanation, die ein tiefes Eindringen dieser in die Atmosphäre unwahrscheinlich macht.

In ähnlicher Weise, jedoch ohne Rücksicht auf die Verteilung der Trägerzahlen auf die verschiedenen spezifischen Geschwindigkeiten sind Messungen des Gehalts der Luft an radioaktiven Induktionen von K. W. F. Kohlrausch und von K. Kurz ausgeführt worden, die der Größenordnung nach übereinstimmende Werte ergeben haben. Nach den Messungen des ersten Beobachters scheint der Gehalt an radioaktiven Induktionen mit der Zahl der leichtbeweglichen Ionen und der absoluten Feuchtigkeit zu wachsen, mit der Bewölkung zu sinken. Bei abnehmendem Luftdruck wurden größere Werte gefunden als bei steigendem; die kleinsten Werte zeigten sich während und nach dem Fall von Regen. Diese Zusammenhänge sind nach dem oben Gesagten verständlich.

Auf die nach der Elster-Geitelschen Methode erhaltenen „Aktivierungszahlen" näher einzugehen, kann hier unterbleiben, da sie quantitative Schlüsse nicht zulassen. Qualitativ zeigt das schon recht ansehnliche Beobachtungsmaterial das Vorkommen der Induktion an allen Stationen. Auch auf dem freien Ozean sind die Induktionen von Radium nachgewiesen worden.

Ein Maß für die in der Atmosphäre ionisierend wirkenden radioaktiven Substanzen erhält man nach McLonnan durch Messung des Sättigungsstromes in einem abgeschlossenen Gefäß. Dieser wird im wesentlichen durch die durchdringenden Strahlungen unterhalten, die herrühren von den im Erdboden lagernden radioaktiven Stoffen, den Induktionen, die in der Nachbarschaft des Beobachtungsortes teils in der Luft, teils an der Erdoberfläche niedergeschlagen vorhanden sind. Der erste Anteil darf als zeitlich merklich konstant angesehen werden; die zur Beobachtung kommenden Schwankungen des Sättigungsstromes rühren also von der Veränderlichkeit der beiden letztgenannten Anteile her. Wood und Campbell entdeckten eine tägliche Periode dieser Strahlungsintensität mit Maximis am Morgen und am Abend. Dieselbe tägliche Schwankung fanden Mache und Rimmer, welche auch eine erhebliche Zunahme des Effektes nach dem Fall von Niederschlägen feststellen konnten. Eine frisch gefallene Schneedecke vermindert zunächst den Effekt, indem sie zunächst die Diffusion der emanationshaltigen Bodenluft beeinträchtigt und damit die Nachlieferung von Induktionen in der Luft und auf der Oberfläche der Schneedecke herabsetzt. Erst wenn der Emanationsgehalt in den Poren der Schneedecke nach hinreichender Zeit gestiegen ist, tritt mit zunehmendem Emanationsgehalt der Luft auch wieder die vorher beobachtete Größe des Sättigungsstromes in dem geschlossenen Gefäß ein.

Von C. T. R. Wilson und nach ihm von einer ganzen Reihe anderer Beobachter ist die Radioaktivität der Niederschläge untersuht worden. Regen und relativ noch stärker Schnee zeigen einen merklichen Gehalt an Radiuminduktionen, der durch schnelles Eindampfen des Wassers konzentriert werden kann. Die Aktivität ist stärker beim Beginn des Falles von Niederschlägen als später. Vermutlich werden die Träger der Induktionen durch die Niederschlagspartikel nicht nur mitgerissen, sondern sie vereinigen sich wohl auch mit ihnen, weil die Niederschläge häufig negative Ladung tragen oder weil die Induktionsträger dem Wasserdampf als Kondensationskerne dienen.

Außer den radioaktiven Substanzen, denen sicherlich der Hauptanteil an der Ionisierungsarbeit in der Atmosphäre zufällt, sind noch einige andere Quellen bekannt, aus denen die Ionenzahl der Atmosphäre ergänzt wird. Soweit diese in den unteren Schichten der Atmosphäre zur Geltung gelangen, haben sie wahrscheinlich neben den radioaktiven Ionisatoren nur geringe und meist lokale Bedeutung.

Auf die Ionisierung durch Ionenstoß, die bei Gewittern und ähnlichen Erscheinungen Platz greift, sei hier kurz verwiesen; sie hat wegen ihrer relativen Seltenheit und, weil die so erzeugten hohen Ionendichten schnell durch Molisierung verschwinden, nur geringe Bedeutung.

Größere aber auch nur lokale Bedeutung hat die Elektrisierung durch Lenard-Effekt. Beim Zerstäuben von Wasser treten negative Ionen in die Luft, während die Wassertropfen positive Ladung annehmen. Dieses Phänomen äußert

sich als Störung bei Potentialgefälle-Messungen in der Nähe von Wasserfällen, insofern die Luft negative Ladung enthält, die zu abnormen negativen Gefällewerten Anlaß gibt (Wasserfallelektrizität). Geringe Zusätze zum Wasser können einen Vorzeichenwechsel des Effektes herbeiführen; so wird die Luft durch Zerstäuben von verdünnter Kochsalzlösung positiv elektrisiert. Dieser Vorgang scheint in der Tat auch für die Atmosphäre Bedeutung zu haben und erklärt vielleicht die hohen Werte des Potentialgefälles und der positiven Ladungsüberschüsse, die Ionengehalts- und Leitfähigkeitsmessungen in der Nähe der Meeresbrandung ergeben haben. Auch die lichtelektrische Wirkung, die, wie Elster und Geitel gezeigt haben, an Granit und Flußspat merklich ist, hat wohl für die Atmosphäre als Quelle negativer Ionen lokale Bedeutung.

In größeren Höhen der Atmosphäre spielt wahrscheinlich die Ionisierung durch ultraviolettes Sonnenlicht eine bedeutende Rolle; danach ist zu vermuten, daß in dieser Höhe eine sehr deutliche tägliche Periode der Leitfähigkeit herrscht.

III. Elektrische Strömungen in der Atmosphäre. 14. Der normale Leitungsstrom und Konvektionsstrom. Die elektrischen Strömungen in der Atmosphäre setzen sich aus zwei Anteilen zusammen: dem Leitungsstrom und dem Konvektionsstrom. Unter Leitungsstrom wird der dem elektrischen Felde und der spezifischen Leitfähigkeit proportionale Strom verstanden, unter Konvektionsstrom der von dem elektrischen Felde unabhängige durch die Bewegung freier elektrischer Ladungen vermittelte Strom.

Von den in der Atmosphäre vorkommenden Strömungen sollen zunächst die normalen behandelt werden, die statthaben, solange Störungen durch Niederschläge fehlen.

Für die Stromdichte des normalen Leitungsstromes erhält man

$$j_{lx} = -\frac{dV}{dx}\cdot\lambda,\quad j_{ly} = -\frac{dV}{dy}\cdot\lambda$$

$$j_{lz} = -\frac{dV}{dz}\cdot\lambda$$

worin j_{lx}, j_{ly}, j_{lz} die Komponenten der Stromdichte nach den Koordinatenrichtungen bezeichnen. Da für normale luftelektrische Verhältnisse nur die Vertikalkomponente des elektrischen Feldes eine Bedeutung hat, ist im allgemeinen auch nur eine Vertikalkomponente der Stromdichte $j_{lh} = -\frac{dV}{dh}\cdot\lambda$ vorhanden. Ihre Größe am Boden läßt sich aus den oben gemachten Angaben über das Potentialgefälle und die Leitfähigkeit am Boden schätzen; nehmen wir für das Potentialgefälle rund 100 Volt/m (entsprechend $^1/_{300}$ elst.) für die Leitfähigkeit 2.10^{-4} elst., so ergibt sich für

$$j_{lh} = \frac{1}{300}\cdot 2\cdot 10^{-4} = 6{,}67\cdot 10^{-7}$$

in elektrostatischem Maße oder $2{,}2.10^{-16}$ Amp/cm².

Die Komponenten der Stromdichte des Konvektionsstromes j_{kx}, j_{ky}, j_{kz} erhalten wir, indem wir die der Konvektion unterworfenen räumlichen Ladungsdichten mit den ihnen zukommenden Translationsgeschwindigkeiten multiplizieren und die Summe über alle vorhandenen Arten von Ladungen (Ionen, Staubteilchen und Wassertröpfchen mit Ladung u. a. m.) summieren:

$$j_{kx} = \Sigma_i\, \varrho_i\, G_{xi}$$

usw., worin die ϱ_i die Ladungsdichten verschiedener Art, G_{xi} die zugehörigen Geschwindigkeitskomponenten bezeichnen. Darin müssen die ϱ_i der Bedingung genügen

$$-4\pi\Sigma\varrho_i = \frac{d^2V}{dh^2},$$

wenn wir wie bisher von horizontalen Komponenten des Potentialgefälles und deren Aenderungen absehen. Um eine Schätzung über die Größe des normalen Konvektionsstromes zu erhalten, nehmen wir für die unteren Schichten der Atmosphäre den oben geschätzten Wert von $2{,}7.10^{-9}$ elst. Einheiten für die räumliche Ladungsdichte an; dann erhält man für die Horizontalkomponente schon bei rund 2,5 m/sec Windgeschwindigkeit einen Konvektionsstrom, der gleich ist dem vertikalen Leitungsstrom. Der horizontale Konvektionsstrom ist also in den unteren Schichten von der gleichen Größenordnung wie der vertikale Leitungsstrom; in größeren Höhen wird er nur da merkliche Werte aufweisen können, wo etwa an der Grenze von Adsorptionsschichten stärkere Ladungsdichten angehäuft sind. Bei der Schätzung der Vertikalkomponente des Konvektionsstromes begegnet man der Schwierigkeit, daß über die vertikale Komponente der Luftbewegung vorerst noch geringes Material an Beobachtungen vorliegt. In der unmittelbaren Nähe des Erdbodens muß sie — und mit ihr die Vertikalkomponente des Konvektionsstromes, soweit er von der Luftbewegung abhängt, verschwinden. Nimmt man, was für größere Gebiete aufsteigender oder absteigender Luftbewegung schon einen recht hoch liegenden Wert darstellen dürfte, die Vertikalkomponente der Luftbewegung zu 0,1 m/sec an, so würden sich für die Vertikalkomponente des Konvektionsstromes $2{,}7.10^{-8}$ elektrostatische Einheiten ergeben, also etwa $^1/_{25}$ des Wertes, der oben für den vertikalen Leitungsstrom geschätzt wurde. In größeren Höhen kommen zwar erhebliche Vertikalkomponenten der Luftbewegung vor, die

lokale Werte von einigen m/sec errechien können; da aber in diesen Höhen die räumliche Ladungsdichte sehr viel kleinere Werte hat, wie am Boden, so wird auch hier nur in besonderen Fällen der vertikale Konvektionsstrom die Größenordnung des vertikalen Leitungsstromes erreichen.

15. Messung und Registrierung des vertikalen Leitungsstromes. Wegen der geringen Größe des vertikalen Leitungsstromes stößt seine direkte Messung mittels handlicher transportabler Apparate auf Schwierigkeiten. Auf indirektem Wege kann er nach dem Vorgange von H. Gerdien durch gleichzeitige Messungen des Potentialgefälles und der spezifischen Leitfähigkeit ermittelt werden. Mittels einer stationären Einrichtung kann nach H. Ebert der Vertikalstrom gemessen werden, indem man eine mehrere qm große leitende Fläche isoliert über dem Erdboden anbringt, sie eine Zeitlang der Luft aussetzt und durch ein ballistisches Galvanometer zur Erde entladet. Von C. T. R. Wilson ist neuerdings eine transportable Apparatur angegeben worden, welche durch eine kleine Modifikation des oben erwähnten Apparates zur Messung des Potentialgefälles auch Bestimmungen des vertikalen Leitungsstromes am Erdboden vorzunehmen gestattet. G. C. Simpson hat in ähnlicher Weise wie Ebert eine größere isolierte Fläche benutzt, deren Aufladung durch den Vertikalstrom er mittels eines Benndorfschen Elektrometers und einer besonderen, auf dem Prinzip des Tropfkollektors beruhenden Entladevorrichtung registrierte.

Sämtliche Methoden, von denen die der simultanen Potentialgefälle- und Leitfähigkeitsmessung auch im Freiballon angewendet ist (H. Gerdien), haben der Größenordnung nach übereinstimmende Werte ergeben.

16. Beobachtungsresultate. Die bisher von verschiedenen Punkten der Erdoberfläche vorliegenden Messungen der Dichte des vertikalen Leitungsstromes ergeben eine auffallende Konstanz desselben. Diese Gesetzmäßigkeit ist um so bemerkenswerter, als an den einzelnen Beobachtungsstationen die Werte der Leitfähigkeit und des Potentialgefälles großen Abweichungen unterliegen. Die Konstanz des Vertikalstromes mag folgende Tabelle erweisen:

Ort	j_{lh} in elektrostat. E.
Göttingen	$8{,}0 \cdot 10^{-7}$
Potsdam	$6{,}6 \cdot 10^{-7}$
Island	$9{,}0 \cdot 10^{-7}$
Schottland	$6{,}6 \cdot 10^{-7}$
Simla (Indien)	$5{,}4 \cdot 10^{-7}$
Samoa	$6{,}4 \cdot 10^{-7}$

Die einzelnen Werte haben allerdings durchaus ungleiches Gewicht (der Wert für Simla z. B. beruht nur auf Messungen an 10 Tagen), immerhin zeigen sie eine, besonders im Hinblick auf die verschiedenen klimatischen Verhältnisse der Beobachtungsstationen bemerkenswert geringe Veränderlichkeit.

Auch an einem einzelnen Beobachtungsorte zeigt der vertikale Leitungsstrom geringere zeitliche Schwankungen als das Potentialgefälle und die Leitfähigkeit allein. Dieses Verhalten wird verständlich, wenn man die vertikale Elektrizitätsströmung in der Atmosphäre als einen quasi stationären Vorgang auffaßt; würde nämlich in der Höhe merklich konstant positive Elektrizität nachgeliefert, so müßte sich, wenn in irgendeiner Schicht die Leitfähigkeit einen kleineren (größeren) Wert annimmt, nach Verlauf einer geraumen Zeit in dieser Schicht ein entsprechend größerer (kleinerer) Wert des Potentialgefälles einstellen, so daß das Produkt von Potentialgefälle und Leitfähigkeit, der vertikale Leitungsstrom angenähert konstant bleibt.

Der gleiche Umstand wird für die merkwürdige Unveränderlichkeit des vertikalen Leitungsstromes als maßgebend anzusehen sein, die H. Gerdien bei seinen Messungen im Freiballon vorfand. So variierte bei wesentlich antizyklonaler Wetterlage in den durchmessenen Schichten das Potentialgefälle im Verhältnis 25:1, die Leitfähigkeit im Verhältnis 1:27, die Dichte des vertikalen Leitungsstromes dagegen nur im Verhältnis 1:4, bei einer anderen Fahrt, die bei zyklonaler Wetterlage stattfand, variierte das Potentialgefälle im Verhältnis 5:1, die Leitfähigkeit im Verhältnis 1:6, die Dichte des vertikalen Leitungsstromes nur im Verhältnis 1:2. Bemerkenswert ist ferner das Verhältnis der absoluten Beträge des Vertikalstromes an diesen beiden Tagen: das Maximum bei zyklonaler Wetterlage ist fast 3,5 mal so groß wie das Maximum bei antizyklonaler Wetterlage.

Größere Abweichungen des Vertikalstromes wurden nur unterhalb von Schichten beobachtet, die, wie der Verlauf des Potentialgefälles mit der Höhe zeigte, starke positive Ladungen führten und sich meteorologisch als Stabilitäts- und Grenzschichten erwiesen; unterhalb dieser Schichten hatte der Vertikalstrom größere Werte. Das würde verständlich sein, wenn man annehmen wollte, daß in der Stabilitätsschicht durch den horizontalen Konvektionsstrom stärkere positive Ladungen herangeführt werden, die unterhalb der Schicht so lange zu einem stärkeren Abströmen im Leitungsstrome Anlaß geben, bis der stationäre Zustand wieder erreicht ist. Auf diese Betrachtungen wird weiter unten bei der Erörterung des Elektrizitätshaushalts der Erde noch zurückgegriffen

werden. Die Messung des Verlaufes des Vertikalstromes mit der Höhe ist von besonderer Wichtigkeit für das Problem der atmosphärischen Elektrizität, weil sie notwendig zur Aufdeckung derjenigen Ursachen führen muß, die die Nachlieferung der positiven Ladungen in der Atmosphäre besorgen, welche zur Unterhaltung des Vertikalstromes erforderlich sind. In allen Fällen, wo in einer bestimmten Schicht eine Abnahme des Vertikalstromes merklich wird, muß notwendig — stationären Zustand vorausgesetzt — eine Quelle positiver Ladungszufuhr in und unter dieser Schicht gesucht werden. Eine solche Schicht dürfte vielfach an der oberen Grenze des Staub- und Dunstmeeres der Atmosphäre in rund 3000 m Höhe anzutreffen sein.

17. Der gestörte Leitungs- und Konvektionsstrom. Niederschlags- und Gewitterelektrizität. Die größten Abweichungen des Leitungs- und Konvektionsstromes von ihrem gewöhnlichen Verhalten kommen im Zusammenhang mit Niederschlägen vor. Sowohl das Potentialgefälle zeigt starke Beeinflussung als auch die Leitfähigkeit; zugleich treten starke räumliche Ladungsüberschüsse auf. Alle diese Störungen hängen zusammen mit starken Ladungen, die ihren Sitz auf den Elementen der Wolken und auf den fallenden Niederschlägen haben.

Die Elektrizität der Niederschläge ist zuerst von Elster und Geitel untersucht worden. Die von ihnen benutzte Anordnung war folgende: Die Niederschläge wurden auf einer wohlisolierten und vor der Influenz durch das elektrische Feld der Atmosphäre möglichst geschützten Metallschale aufgefangen, die mit einem Quadrantenelektrometer verbunden wurde. Die Schale wurde während einer gemessenen Zeit den Niederschlägen freigegeben, dann wurde ein Deckel über die Einfallsöffnung des Apparates gedeckt und das Potential abgelesen, bis zu welchem sich das isolierte System aufgeladen hatte. Darauf wurde das System entladen und die Schale von neuem den Niederschlägen ausgesetzt; gleichzeitig wurden Messungen des Potentialgefälles vorgenommen. Die etwas modifizierte Elster-Geitelsche Anordnung wurde später von H. Gerdien zur kontinuierlichen Registrierung der von den Niederschlägen der Auffangschale zugeführten Stromstärke benutzt; gleichzeitig wurde das Potentialgefälle und die Niederschlagsmenge kontinuierlich registriert. Von Kähler und von Simpson sind ausgedehnte Registrierungen der Niederschlagselektrizität mittels des Benndorfschen Elektrometers ausgeführt worden. Weiß beobachtete nach einem von Mache angegebenen Verfahren, wobei die Niederschläge auf einer steifhaarigen, dichten, durch Eintauchen in Chlorcalciumlösung leitend gemachten Bürste aufgefangen wurden, die auf einem isolierenden Griff befestigt war. Hier findet kein Zerspritzen der Tropfen statt, das sonst leicht durch Lenard-Effekt zur Fehlerquelle werden kann. Nach der Exposition wurde die Bürste unter einem Schirm in den Beobachtungsraum gebracht und hier ihre Ladung mittels eines Hankelschen Elektrometers bestimmt. Vor und nach jeder Exposition wurde das Potentialgefälle gemessen und zugleich die Niederschlagsmenge nach Wiesner (Auffangen einzelner Tropfen oder Flocken auf einem mit Eosin präparierten Filtrierpapier) bestimmt.

Wichtige Aufschlüsse über die Verteilung der Ladungen bei Niederschlägen sind durch die Registrierung des Potentialgefälles an drei benachbarten Stationen am Potsdamer Meteorologischen Observatorium erhalten worden.

Starke Volumenladungen bei Gewittern und Niederschlägen wurden von Langevin und von Mache mittels eines Kollektors nachgewiesen, der unter einer als Schutzdach dienenden Platte durch ein weitmaschiges Drahtnetz gegen das elektrische Feld geschützt arbeitete.

Die Niederschlagsladungen zeigen häufig Wechsel des Vorzeichens, der mit solchem bei dem Potentialgefälle übereinstimmt; gewöhnlich zeigen dabei Niederschlagselektrizität und Potentialgefälle entgegengesetztes Vorzeichen. Häufiger werden aber auch Fälle beobachtet, bei denen das Potentialgefälle in abweichender Weise variiert; insbesondere kommen bei dem Potentialgefälle gelegentlich schnelle Aenderungen und auch Vorzeichenwechsel vor, die bei der Niederschlagselektrizität fehlen. Häufig zeigt sich bei Böen und Gewittern eine merkliche Beeinflussung des Potentialgefälles, ehe noch Niederschlagsladung hervortritt („Frontwirkung").

Zwischen der Niederschlagsladung und Niederschlagsmenge besteht keine gesetzmäßige Beziehung. Häufig fallen längere Zeit nahezu ungeladene Niederschläge; andererseits kommen Böenregen vor, die bei sehr kleiner Niederschlagsmenge erhebliche Ladungen mitführen. Bei Gewittern haben zuweilen die ersten fallenden Tropfen sehr starke Ladung. Für die mit einem Gramm Niederschlagsmenge zur Erde beförderte Ladung sind Werte von 1 bis zu 35 elektrostatischen Einheiten beobachtet worden.

Von Elster und Geitel und von Gerdien wurde ein Ueberschuß an negativer Niederschlagsladung gefunden. Weiß und Kähler fanden positive Ladungsüberschüsse; G. C. Simpson beobachtete in Indien bis zu 75% positiven Ueberschuß.

Bei gewöhnlichen Regen- und Schneefällen vom „Landregen"-Typus beträgt die der Erde zufließende Stromdichte etwa 10^{-16} bis 10^{-15} Amp/cm², erreicht gelegentlich 10^{-14} Amp/cm². Bei kleineren Böen und Gewittern kommen Stromdichten von der Ordnung 10^{-15} bis 10^{-14} Amp./cm² vor, die auch wohl auf 10^{-13} Amp/cm² anwachsen. Oft werden bei Gewittern und Böen Stromdichten von 10^{-12} Amp/cm² für kurze Zeit erreicht.

Das Potentialgefälle erreicht bei gewöhnlichen Regen- und Schneefällen Werte von 1000 bis 2000 Volt/m; charakteristisch ist das seltene Vorkommen starker positiver Felder. Bei Böen und Gewittern verlaufen die Schwankungen des Potentialgefälles noch schneller; es werden auch größere Werte erreicht, die bei heftigen Gewittern wohl über 10000 Volt/m hinausgehen. Die Potsdamer Beobachtungen des Potentialgefälles an drei benachbarten Stationen haben gezeigt, daß sich die Störungen bei gewöhnlichen Regenfällen regelmäßig in der Richtung des Regenzuges fortpflanzen. Zuweilen zeigen die Verläufe bis auf kleine Abweichungen gute Uebereinstimmung; die Abweichungen betreffen hauptsächlich die absolute Größe des Potentialgefälles, die vermutlich mit der an den verschiedenen Stationen verschieden starken Regenintensität zusammenhängt. Größere Abweichungen wurden an den benachbarten Stationen bei Böen beobachtet; bei den meisten Böen stimmt die „Frontwirkung" an allen drei Stationen überein. Es kommen aber auch Böen vor, bei denen an zwei Stationen z. B. eine negative Frontwirkung auftritt, während die dritte seitlich gelegene Station eine positive Frontwirkung hat. Für die Böenrückseite ergeben sich ähnliche Verhältnisse wie für die Front. Gewitter verhalten sich im allgemeinen ähnlich wie die Böen.

18. Leuchtende Entladungen in der Atmosphäre (vgl. auch den Artikel „Blitz"). Aus dem großen Beobachtungsmaterial, das sich auf die Blitzentladungen bezieht, können hier nur die für den Elektrizitätsaustausch wichtigsten und quantitativ wenigstens schätzungsweise zugänglichen Tatsachen aufgeführt werden.

Die leuchtenden Entladungen sind meistens Begleiterscheinungen intensiver Niederschlagsphänomene. Die zwischen Wolken und zwischen Wolke und Erde übergehenden, reich verästelten Funken- oder Linienblitze erreichen selten mehr als 2 bis 3 km Länge. Sie zeigen nach Kundt das Linienspektrum von Stickstoff, Sauerstoff, Wasserstoff, nach neueren Beobachtungen auch Linien, die zu den Spektren einiger Edelgase gehören. Nach Elster und Geitel ist die Farbe des Blitzes rötlich, wenn die Erde Anode, und die Wolke Kathode ist, bläulich, wenn das Entgegengesetzte der Fall ist. Oszillierende Entladungen sind wahrscheinlich äußerst selten; dagegen ist durch Blitzphotographien mit ruhender und bewegter Kamera nachgewiesen worden, daß der gleiche Entladungsweg in sehr kurzen Zeitintervallen — oft vom Winde inzwischen seitlich verschoben — mehrfach durchschlagen wird.

Als besonders merkwürdig werden von einigen Beobachtern Blitze aufgeführt, die von dem oberen Teile der Gewitterwolken ausgehend nach dem heiteren Himmel hin ausstrahlen.

Flächenblitze — nicht zu verwechseln mit dem Aufleuchten einer Wolke im durchfallenden oder auffallenden Lichte eines Funkenblitzes — zeigen das Bandenspektrums des Stickstoffes; sie sind offenbar schwächere Glimmentladungen, die den Elektrizitätsausgleich innerhalb der Wolken zwischen Bereichen vermitteln, deren Kondensationsprodukte eine hinreichende Potentialdifferenz erlangt haben. Bei Gewittern treten Flächenblitze häufig gleichzeitig mit starken Funkenblitzen oder kurze Zeit nach diesen auf. Das Vorkommen der Flächenblitze ist nicht an die typischen Gewitterwolken — Cumulo-Nimbi — gebunden; sie sind vielmehr schon als schwaches Aufleuchten (meist ohne begleitenden Donner) bei Stratuswolken und seltener bei allen anderen Wolkenformen beobachtet worden.

Auf die selten vorkommende Entladungsform der Perlschnurblitze und Kugelblitze mag lediglich der Vollständigkeit wegen verwiesen werden. Laboratoriumsversuche zur Nachahmung dieser Erscheinungen nahm Töpler vor.

Eine häufige Begleiterscheinung der Gewitter, die aber ähnlich wie der Flächenblitz nicht an diese gebunden ist, bildet das Elmsfeuer; es ist der bei hinreichend großem Potentialabfall an hervorragenden Punkten des Geländes einsetzende positive (große fächerartige Ausströmung) oder negative (kleines Lichtbündel) Spitzenstrom. Das Elmsfeuer tritt besonders häufig auf Bergspitzen bei Niederschlägen auf und die Beobachtung seiner Form kann zur Bestimmung des Vorzeichens des Potentialgefälles benutzt werden.

Im Flachlande beobachtet man das Elmsfeuer außer bei Gewittern besonders häufig an Wintertagen mit niedriger Bewölkung.

Ueber die Spannungsdifferenzen, die bei Blitzentladungen zum Ausgleich kommen, sind nur sehr unsichere Schätzungen möglich; für die Größenordnung dürften etwa 10^9 Volt zutreffend sein.

Die bei Blitzentladungen der Erde zufließenden Maximalstromstärken lassen sich nach einem von F. Pockels erprobten Verfahren schätzen: legt man in gemessenem Abstande von Blitzableitern Stäbchen aus

Basalt nieder, so läßt sich aus dem Moment der permanenten Magnetisierung, das die Stäbchen nach einer durch den Blitzableiter geflossenen Entladung zeigen, die Maximalstromstärke derselben bestimmen. Das Verfahren kann, sobald die Blitzspur erkennbar ist, auch im offenen Gelände unter Benutzung von Gesteinstrümmern angewendet werden. Die Größenordnung der Maximalstromstärke ergibt sich zu etwa 10^4 Ampere. Als die überwiegende Stromrichtung bei Blitzen zwischen Wolke und Erde hat sich aus Magnetisierungswirkungen die Richtung Erde→Wolke ergeben; allerdings ist die Methode von der Verästelung der Blitze beeinflußt und dürfte daher keine Sicherheit bieten.

Messungen der Dauer der Blitzentladung mittels rotierender Scheiben haben ergeben, daß diese bisweilen nur etwa $^1/_{1000}$ Sekunde beträgt; sie kann aber auch einige Zehntelsekunden erreichen. Flächenblitze haben gelegentlich einige Sekunden Dauer.

Die bei Blitzen zur Entladung kommende Elektrizitätsmenge kann von der Größenordnung 100 Coulomb geschätzt werden.

Auch aus den Schmelzwirkungen und mechanischen Zerstörungswirkungen der Blitze kann man auf eine recht bedeutende Größe der umgesetzten elektrischen Energie schließen. Auf die meteorologische Blitz- und Gewitterstatistik, deren jüngstes Hilfsmittel der Gewitterregistrator (Luftdraht, verbunden mit einem registrierenden Detektor) ist, kann hier nicht eingegangen werden (vgl. den Artikel „Blitz“).

Der durch Blitzschläge angerichtete Schaden weist sehr beträchtliche zeitliche Schwankungen auf, die außer von der dauernden Wertänderung der betroffenen Objekte im wesentlichen von der Zahl der zündenden Blitze abhängt. Um von der Veränderlichkeit dieser Zahl ein Beispiel zu geben, seien die folgenden Daten angeführt: Die Anzahl der zündenden Blitze betrug in Preußen im Jahre

1884	1456
1885	1327
1886	1131
1887	766
1888	936
1889	1251
1890	1019
1891	1202

Maxima wurden in den Jahren 1895 und 1905 mit 1620 und 1642, ein Minimum 1904 mit 714 zündenden Blitzen beobachtet.

Der Jahresdurchschnitt des Blitzschadens in Preußen für den Zeitraum 1885 bis 1907 betrug 5,1 Mill. M. (Minimum 2,75; Maximum 9,218 Mill. M.).

Die Blitzschutzvorrichtungen an Gebäuden haben den Zweck, Zerstörungswirkungen von Blitzentladungen unmöglich zu machen; Auffangevorrichtungen, die zweckmäßig alle hervorragenden Teile des Daches überragen und mit allen metallenen Teilen des Daches leitend verbunden sind, sind durch eine hinreichende Anzahl von Gebäudeleitungen (Steigleitungen) mit der Erdleitung verbunden. Bei der Ausführung der Gebäudeleitungen muß möglichst kleine Selbstinduktion, bei derjenigen der Erdleitung möglichst kleiner Uebergangswiderstand angestrebt werden. Wo ein Anschluß an Gas- oder Wasserleitungsnetze möglich ist, erübrigt sich eine besondere Erdleitung. Wegen der Blitzschutzvorrichtungen, die in der Schwach- und Starkstromtechnik üblich sind, muß auf den Artikel „Blitz“ verwiesen werden.

19. Hypothesen zur Niederschlags- und Gewitterelektrizität. Dem Auftreten der Niederschlagsladungen und damit auch der Gewitterelektrizität liegen wahrscheinlich mehrere verschiedene Phänomene zugrunde, die im folgenden kurz an der Hand der Ionenhypothese beleuchtet werden sollen.

Vermutlich spielt bei den gewöhnlichen Regenfällen vom Landregentypus die Ionenadsorption eine wichtige Rolle. Es werden teils die staubförmigen Kondensationskerne, insbesondere wenn sie vor Eintreten der Kondensation schon schichtförmig angeordnet waren, unter der Wirkung des normalen Potentialgefälles durch Einwanderung und Adsorption von Ionen Ladungen annehmen können, die mit den an ihnen niedergeschlagenen Kondensationsprodukten zur Erde befördert werden, teils werden auch die durch die Luft fallenden Niederschläge durch Adsorption vorzugsweise von negativen Ionen (Schmauß) zur Ladungstrennung Anlaß geben.

Bei den mehr turbulenten Niederschlägen in Böen und Gewittern ist vermutlich noch ein anderes Phänomen an der Ladungstrennung bei der Kondensation wirksam. Auf Grund der Beobachtungen von C. T. R. Wilson kann man annehmen, daß in der Atmosphäre unter gewissen Bedingungen eine sehr vollständige Trennung der negativen Ionenladungen von der positiven statthat. Zu diesen Bedingungen gehört erstens der Fortfall aller staubförmigen Kondensationskerne, der etwa durch eine erstmalige Kondensation an Niederschlägen bewirkt werden könnte, zweitens das Fortbestehen des zur Ausfällung von Niederschlägen erforderlichen aufsteigenden Luftstromes ohne neue Beimischung staubartiger Kerne bis zum Eintritt vierfacher Uebersättigung des in ihm vorhandenen Wasserdampfes. Nach den Beobachtungen Wilsons würde nämlich bei vierfacher Uebersättigung zunächst nur an den negativen Jonen Kondensation eintreten und erst bei etwa 6facher Uebersättigung auch an den positiven Ionen. Da im allgemeinen der erste Kondensationspunkt häufiger erreicht werden wird als der zweite, so wäre auf Grund dieser Phänomene ein Ueberwiegen der negativen Elek-

trizität bei der Niederschlagsladung zu erwarten (H. Gerdien).

Von G. C. Simpson wird eine besondere Form des Lenard-Effektes zur Erklärung der Niederschlagsladungen herangezogen. In der Luft sind nur Wassertropfen bis zu einer Fallgeschwindigkeit von etwa 8 m/sec stabil; größere Tropfen, die etwa durch Zusammenfließen kleinerer entstehen, zerspritzen nach kurzer Zeit. Kommt es also in dem aufsteigenden Luftstrom zu einer 8 m/sec erreichenden oder übersteigenden Geschwindigkeit, so wird eine Anreicherung von Tropfen eintreten, die fortgesetzt zusammenfließen und sich wieder zerteilen. Bei diesem Vorgang wird durch Lenard-Effekt das Wasser stark positiv aufgeladen, während die freigemachten negativen Ionen von dem aufsteigenden Luftstrom entführt werden. Auf Grund dieser Vorstellung wäre also ein Ueberwiegen positiver Elektrizität bei der Niederschlagsladung zu erwarten.

20. Der Elektrizitätshaushalt der Erde und der unteren Atmosphäre. Im normalen Leitungsstrom wird der Erde dauernd positive Elektrizität aus der Atmosphäre zugeführt. Diese positiven Ladungen stammen, wie die Messungen des Verlaufes des Vertikalstromes mit der Höhe gezeigt haben, nicht nur aus den untersten Schichten, sondern werden in nur wenig verringerter Stärke noch in rund 6000 m Höhe angetroffen. Eine vollständige Beschreibung der luftelektrischen Phänomene muß eine Erklärung dafür enthalten, wie und durch welche Energiequellen die positiven Ladungen in die Atmosphäre hineingeschafft werden, die wir im normalen Leitungsstrom dauernd zur Erde fließen sehen.

Von den Hypothesen, die sich in neuerer Zeit mit der Aufklärung dieser Frage beschäftigt haben, ist zunächst die Elster-Geitelsche Adsorptionshypothese zu nennen. Dieser Erklärungsversuch stützt sich auf die Eigenschaft der negativen Ionen, unter normalen Umständen eine größere Diffusionskonstante zu zeigen als die positiven; aus einem ionisierten Gase müssen nämlich danach gegen einen Leiter — einen Raum von verschwindender Ionenkonzentration — in gleichen Zeiten mehr negative als positive Ionen hindiffundieren und zwar so lange, bis durch die negative Ladung des Leiters im umgebenden Gase ein Feld erzeugt wird, das einen Gleichgewichtszustand herbeiführt, indem es für vermehrtes Zuströmen der positiven Ionen sorgt. Dieser Prozeß mußte nach Elster und Geitel an der Erdoberfläche ständig stattfinden und zwar mit besonderer Intensität an allen denjenigen Stellen, welche durch Vegetation oder dergleichen gegen das starke Feld der Atmosphäre abgeschirmt sind. Durch Experimentaluntersuchungen von G. C. Simpson wurde indessen festgestellt, daß nur unter ganz besonderen Umständen, nämlich beim Hindurchströmen ionisierter Luft durch röhrenartige Hohlräume und auch hier nur bei gewissen Strömungsgeschwindigkeiten der Prozeß der Ionenadsorption zu merklichen Ladungstrennungen Anlaß geben kann. Danach ist zu schließen, daß der von Elster und Geitel vorausgesetzte Vorgang, wenn er überhaupt für die Regenerierung der negativen Erdladung in Betracht kommt, nur einen kleinen Anteil von dem notwendigen Bedarf an negativer Ladung decken kann.

Von H. Ebert ist eine Modifikation dieser Hypothese vorgeschlagen worden, nach der bei sinkendem Luftdruck ionisierte Luft aus den Kapillaren des Erdbodens in die Atmosphäre eindringen soll, wobei sie durch Adsorption vorzugsweise von negativen Ionen an den Kapillarwänden einen Ueberschuß positiver Ladung in die Atmosphäre schaffen soll. Von G. C. Simpson und H. Gerdien sind Einwände gegen die quantitative Wirkung dieses Vorganges erhoben worden.

Das Hauptgewicht muß bei Beurteilung dieser Versuche darauf gelegt werden, daß es darauf ankommt, die Nachlieferung positiver Ladungen bis in ganz beträchtliche Höhen zu erklären, in denen nach den bisherigen Messungen der vertikale Leitungsstrom in fast gleicher Intensität fließt, wie am Erdboden.

Der letzteren Anforderung scheint die von C. T. R. Wilson und H. Gerdien vertretene Auffassung besser gerecht zu werden, nach welcher der Ersatz der positiven Ladung in der Atmosphäre und der negativen Erdladung durch die Kondensation der Niederschläge, die vorzugsweise an negativen Ionen stattfindet, bewerkstelligt werden soll. Allerdings stößt man auch hier auf Schwierigkeiten, wenn es sich darum handelt, den Transport der positiven Ladungen in der Luft aus den Niederschlagsgebieten in die niederschlagsfreien Gebiete in quantitativer Weise zu erklären. Nach den neueren Messungen erscheint es auch zweifelhaft, ob überhaupt durch die Niederschläge ein Ueberschuß an negativer Ladung zur Erde geführt wird. Der letzte Einwand ist allerdings nicht so stichhaltig, wie er auf den ersten Blick erscheint, da die Messungen sich vorläufig nur auf wenige Punkte der Erde und auf verhältnismäßig kleine Zeiten erstrecken. Zudem beziehen sich unsere bisherigen Messungen auch nur auf die von den Niederschlägen mitgeführten Ladungen; die durch den gestörten Leitungsstrom im Niederschlagsgebiet und durch Blitzentladungen der Erde zugeführten Ladungen entziehen sich vorläufig der Schätzung und

könnten sehr wohl imstande sein unsere Bilanz merklich zu verschieben.

Nach dem Gesagten wird man das Problem des Elektrizitätshaushalts der Erde und der unteren Atmosphäre zurzeit noch als ungelöst bezeichnen müssen. Ein Fortschritt ist hier vor allem von einer Erweiterung und Vermehrung des Beobachtungsmaterials zu erwarten.

Literatur. ***F. Exner***, *Wien. Ber.* 93, *S.* 222 *bis* 285, 1886. — ***G. le Cadet***, *Etude du champ électrique de l'atmosphère, Paris* 1898. — ***A. Chauveau***, *Introduction historique et bibliographique à l'étude de l'électricité atmosphérique, Paris* 1902. — ***J. Elster*** *und* ***H. Geitel***, *Jahresbericht des herzoglichen Gymnasiums zu Wolfenbüttel* 1897. — ***H. Gerdien***, *Der Elektrizitätshaushalt der Erde und der unteren Schichten der Atmosphäre, Phys. ZS.* **6**, *S.* 647 *bis* 666, 1905. — ***Derselbe***, *Die atmosphärische Elektrizität in Winkelmanns Handbuch der Physik,* 2. *Aufl.*, **4**, *S.* 687 *bis* 729, 1904. — ***H. Mache*** *und* ***E. v. Schweidler***, *Die atmosphärische Elektrizität (Sammlung, Die Wissenschaft), Braunschweig* 1909. — ***A. Gockel***, *Die Luftelektrizität, Leipzig* 1908.

H. Gerdien.

Atmosphärische Optik.

1. Scheinbare Gestalt des Himmelsgewölbes. 2. Strahlenbrechung: a) Abnormale Strahlenbrechung. b) Luftspiegelung. c) Scintillation. 3. Erscheinungen, die durch Eiskristalle und Wassertropfen erzeugt werden: a) Haloerscheinungen. b) Kränze. c) Regenbogen. 4. Erscheinungen, die durch sehr kleine Partikel in der Atmosphäre erzeugt werden: a) Blaue Himmelsfarbe. b) Polarisation des Himmelslichtes. c) Lichtschwächung in der Atmosphäre. d) Tageslicht. e) Dämmerungserscheinungen.

Zu den Erscheinungen der atmosphärischen Optik rechnet man im allgemeinen alle jene Licht- und Farbeneffekte, die von außerirdischen Lichtquellen (Sonne, Mond, Sterne) erzeugt werden, wenn die Lichtstrahlen die Atmosphäre der Erde passieren. Diese beeinflußt die Lichtstrahlen in verschiedener Weise: einmal als ein Medium von örtlich ungleicher Dichte, im Sinne eines Kontinuums, dann als Träger der zeitweise vorhandenen Kondensationsprodukte des Wassers (Wassertropfen und Eiskristalle), schließlich als Träger der stets in größerer oder geringerer Menge vorhandenen sehr kleinen Partikelchen fester Substanz (Staub); in dieser Beziehung kommen auch die Luftmoleküle selbst in Betracht. Diese Einteilung rührt von C l a u s i u s und P e r n t e r her; wir folgen ihr hier und entnehmen die ganze Darstellung im wesentlichen der Meteorologischen Optik von P e r n t e r - E x n e r (Wien 1910).

1. Scheinbare Gestalt des Himmelsgewölbes. Der Himmel erscheint dem naiven Beobachter nicht als Halbkugel, sondern als ein gedrücktes Gewölbe. Die Entfernung vom Beobachtungsort auf der Erdoberfläche zum Zenith scheint kleiner als die zum Horizont. Es ist dies keine optische Täuschung, denn der Himmel ist nicht etwa tatsächlich eine Halbkugel. H e l m h o l t z schreibt darüber: „Es ist kein entscheidender Grund da, warum der Sternenhimmel nur als eine regelmäßige Kugelfläche erscheinen sollte. Er zeigt unendlich entfernte Objekte; daraus folgt nur, daß er als irgendwelche Fläche von unbestimmter Form erscheinen kann, wenn irgendwelche andere Motive ihm eine solche zuweisen.“ Ein solches Motiv scheint nun tatsächlich im Subjekt des Beobachters vorhanden zu sein. Er sieht bei aufrechter Kopfhaltung die gleichen Gegenstände, wenn sie im Horizont stehen, größer, als wenn er zu ihnen bei gleicher normaler Kopfhaltung aufblicken muß, d. h. den Blick stirnwärts richtet. Infolgedessen erscheint die Himmelsfläche als ein gedrücktes Gewölbe, sie ist am einfachsten als Kugelkalotte zu bezeichnen.

Man überzeugt sich hiervon leicht, wenn man versucht, durch Schätzung den Bogen vom Horizont zum Zenith in zwei gleiche Teile zu teilen; dann verlegt man nämlich nach übereinstimmenden Beobachtungen verschiedener Autoren den Halbierungspunkt in eine Höhe von 22 bis 23° über den Horizont, schätzt also den Bogen vom Horizont bis 22° ebensogroß, wie den Bogen von 22° bis zum Zenith. Erschiene das Himmelsgewölbe als Halbkugel, so müßte der Halbierungspunkt bei 45° Höhe über dem Horizont gesehen werden.

Erfahrungsgemäß ist nebenbei der Himmel um so gedrückter, je heller er ist, also bei Tag gedrückter als bei Nacht, so daß der Wert von 22° nicht ganz konstant ist.

Man hat aus Beobachtungen den Zusammenhang jener scheinbaren Winkelhöhe von Orten am Himmel mit deren wahrer Winkelhöhe ermittelt (R e i m a n n , P e r n t e r). In der Figur 1 sind die Resultate dargestellt. Der flache Kreisbogen bedeutet das Himmelsgewölbe, der Halbkreis dient zur Zählung der wahren Winkelhöhen über dem Horizont. Auf der linken Seite der Figur ist der flache Bogen in 5 gleiche Teile geteilt. Die korrespondierenden wahren Winkelhöhen am Halbkreis zeigen das Anwachsen dieser Stücke gegen den Zenith. Rechts in der Figur ist zum Unterschied der Viertelkreisbogen in 5 gleiche Teile geteilt; die Stücke des flachen Kreises sind in der Nähe des Horizonts groß und nehmen gegen den Zenith ab, d. h. man sieht

gleiche Höhendifferenzen in der Nähe des Horizonts größer als höher oben. Der Winkel von 22° (wahre Winkelhöhe), der erfahrungsgemäß scheinbar 45° beträgt, also das Gewölbe halbiert, ist gleichfalls eingezeichnet. Ei..er wahren Winkelhöhe von

5°	entspricht	eine	scheinbare	Winkelhöhe	v. 13,3°
10°	,,	,,	,,	,,	,, 24,7°
15°	,,	,,	,,	,,	,, 34,1°
20°	,,	,,	,,	,,	,, 42,2°
30°	,,	,,	,,	,,	,, 54,6°
40°	,,	,,	,,	,,	,, 63,7°
50°	,,	,,	,,	,,	,, 70,7°
60°	,,	,,	,,	,,	,, 76,4°
70°	,,	,,	,,	,,	,, 81,4°
80°	,,	,,	,,	,,	,, 85,8°
90°	,,	,,	,,	,,	,, 90,0°

Aus diesem Ueberschätzen der wahren Winkelhöhen über dem Horizonte erklärt sich z. B. die Ueberschätzung der Höhe der Berge, ferner die Tatsache, daß uns Sonne und Mond beim Auf- und Untergang viel größer vorkommen, als wenn sie hoch am Himmel stehen. So erscheint z. B. die Sonne am Horizonte 5 bis 6 mal größer als in einer Höhe von 65°.

Die obige Erklärung, daß dem Auge beim Blick geradeaus die Gegenstände größer erscheinen als beim Blick stirnwärts, wird durch die Beobachtung von G a u ß bestätigt, nach der man den Mond bei hohem Stand am Himmel bedeutend größer sieht, wenn man sich auf den Rücken legt, als bei normaler aufrechter Kopfhaltung. Umgekehrt sieht man den Mond, wenn er nahe dem Horizont steht, bei stark nach vorne geneigter Kopfhaltung kleiner, als in aufrechter Stellung.

Die wesentliche Ursache all dieser Erscheinungen ist also eine physiologische.

2. Strahlenbrechung. Die Strahlenbrechung in der Atmosphäre wird verursacht durch die örtlich ungleiche Dichte der Luft, die bewirkt, daß an der Grenzfläche der Luftschichten von ungleicher Dichte der einfallende Lichtstrahl nach dem Brechungsgesetze aus seiner geraden Bahn abgelenkt wird.

Im allgemeinen nimmt die Dichte der Luft mit der Erhebung von der Erdoberfläche ab; weiter ist normalerweise die Dichte in einer mit der Erdoberfläche parallelen Fläche ungefähr konstant. Wir können aus diesen beiden Annahmen leicht die n o r m a l e S t r a h l e n b r e c h u n g ableiten, wenn wir den Brechungsexponenten kennen. Dieser ist nun für jede Luftschichte ein anderer. Er beträgt für Luft von 0° C bei einem Druck von 760 mm Hg $n = 1.000\,292$; dies ist der Brechungsexponent, bezogen auf den leeren Raum. Der Strahl fällt beim Eindringen in die Atmosphäre zuerst auf Luftschichten von ganz minimaler Dichte, dann bei seinem Vordringen auf allmählich immer dichtere, um schließlich die Schichten an der Erdoberfläche zu erreichen. Er passiert also zahllose Schichten und wird zahllose Male gebrochen, doch ist die jedesmalige Ablenkung nur sehr gering, entsprechend dem Dichteunterschied zweier aneinander grenzender dünner Luftschichten. Die Folge davon ist, daß ein schief einfallender Lichtstrahl sich in der Atmosphäre nicht geradlinig fortpflanzt, sondern eine Kurve beschreibt, die nach unten konkav ist. Trifft der Strahl schließlich die Erdoberfläche, so scheint er von einer Lichtquelle zu kommen, die höher über dem Horizont liegt, als dies in

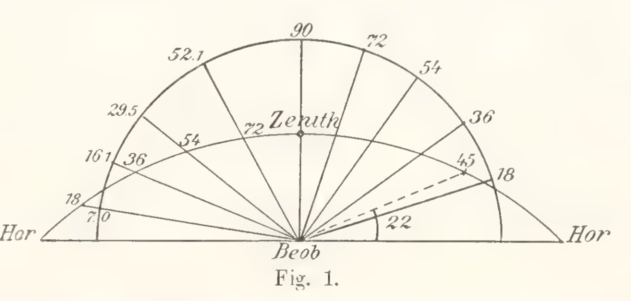


Fig. 1.

Wahrheit der Fall ist. Ein Stern z. B. erscheint also höher am Himmel, als er wirklich ist. Aus Figur 2 geht dies klarer hervor.

Der Beobachter in B, auf der kugelförmigen Erdoberfläche stehend, sieht den Stern in S'; tatsächlich steht aber der Stern in S; der Lichtstrahl, den er aussendet, beschreibt den Weg S 1 2 3 4 B. Die Brechung ist hier nur für einige Trennungsflächen von Schichten gleicher Dichte gezeichnet; diese Flächen sind durch Kreisbögen angedeutet, die alle den gleichen Mittelpunkt haben, wie die Erde, nämlich C. An der ersten Trennungsfläche (1, äußerster Kreisbogen) wird der Strahl gebrochen; der Einfallswinkel sei α_1, der Brechungswinkel β_1; dann ist für diese Brechung $\frac{\sin \alpha_1}{\sin \beta_1} = \frac{n_2}{n_1}$, wenn n_2 den Brechungsexponenten der zweiten Schicht gegen den leeren Raum, n_1 jenen der ersten Schicht bezeichnet. Das Verhältnis $\frac{n_2}{n_1}$ ist natürlich nahezu 1, da sich die Dichte der beiden Schichten nur äußerst wenig unterscheidet. Für die nächste Trennungsfläche 2 wird in analoger Weise $\frac{\sin \alpha_2}{\sin \beta_2} = \frac{n_3}{n_2}$ usw. In der Figur sind nur 4 solcher Schichten

gezeichnet, obwohl in Wahrheit ihre Zahl unendlich groß ist; auch ist der Deutlichkeit wegen die Höhe der Atmosphäre von B bis Z gegenüber dem Erdradius BC ganz enorm übertrieben.

In einem der Dreiecke, z. B. in jenem, das durch die Punkte 1, 2 und C gebildet wird, ist nun aber, wenn r_1 die Entfernung des

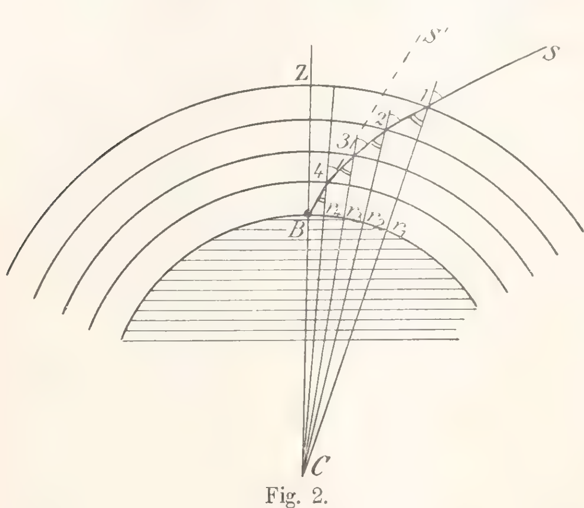


Fig. 2.

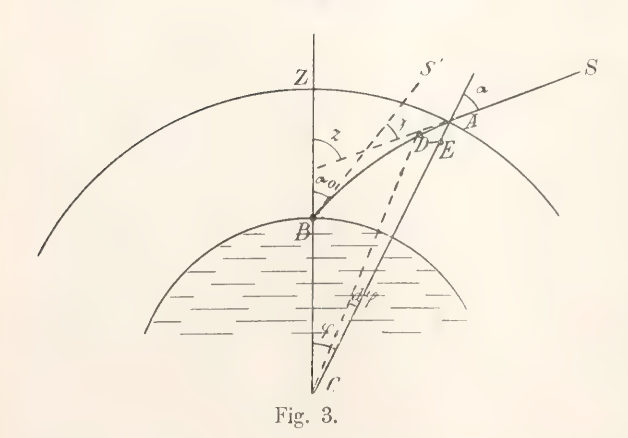


Fig. 3.

Punktes 1 von C, r_2 die des Punktes 2 von C bezeichnet

$$\sin \beta_1 = \frac{1}{r_1} \sin \alpha_2 \cdot r_2.$$

Ebenso ist $\sin \beta_2 = \frac{1}{r_2} \sin \alpha_3 r_3$ usw. Durch Elimination der Werte $\sin \beta$ aus diesen und den obigen Gleichungen ergibt sich dann leicht allgemein: $rn \sin \alpha = c$, wo c eine für den Lichtweg charakteristische Konstante ist.

Obige Gleichung stellt also die Kurve vor, die ein Lichtstrahl vermöge der Strahlenbrechung in der Atmosphäre beschreibt. Aus jener Gleichung kann man zunächst ersehen, daß, wenn der Strahl senkrecht zur Atmosphäre einfällt ($\alpha = 0$), er auch auf seinem ganzen Wege senkrecht zu den Schichten bleibt, also keine Ablenkung erfährt; für ihn ist $c = 0$. Es ist dies aber der einzige Fall, in dem der Lichtstrahl in der Atmosphäre eine geradlinige Bahn beschreiben kann.

Um nun den Gang des Lichtstrahles aus jener Kurve abzuleiten, hat man den Brechungsexponenten als Funktion der Höhe über der Erdoberfläche einzuführen. Diese Funktion hängt von der Temperaturverteilung in der Atmosphäre ab, da die Temperatur die Luftdichte beeinflußt. In der Astronomie und Geodäsie sind der Auswertung obiger Gleichung spezielle Untersuchungen gewidmet. Doch wird trotz aller sehr schwierigen mathematischen Behandlungen dieses Gegenstandes der Strahlengang in der Atmosphäre kaum jemals ganz genau bestimmbar sein, da die Temperatur in hohen Luftschichten fortwährenden Aenderungen unterliegt.

Um aus obiger Gleichung die eigentliche R e f r a k t i o n zu berechnen, d. i. den Winkel γ, um den der Lichtstrahl abgelenkt wird, wenn er die ganze Atmosphäre passiert hat, gehen wir folgendermaßen vor:

In Figur 3 bedeutet wie früher der innere Kreisbogen die Erdoberfläche, der äußere die Grenze der Atmosphäre. α_0 sei der Einfallswinkel des Strahles an der Erdoberfläche, α jener an der Grenze der Luft im Punkte A. Die Refraktion γ ist offenbar gegeben als $z - \alpha_0$, wo z aus der Figur zu entnehmen ist als der Winkel, den die ursprüngliche Strahlenrichtung SA mit der Zenithrichtung BZ bildet. α_0 wird beobachtet; um daher γ zu kennen, muß z berechnet werden.

Man ersieht aus der Zeichnung, daß $z = \varphi + \alpha$ ist, somit für kleine Aenderungen dieser Größen $dz = d\varphi + d\alpha$.

Nun ergibt sich aus dem kleinen Dreieck CDE, wo $AE = dr$ und $DE = dr \operatorname{tg} \alpha$, $r\, d\varphi = dr \operatorname{tg} \alpha$, also $d\varphi = \frac{dr}{r} \operatorname{tg} \alpha$.

Durch Differentiation der Gleichung für die Lichtkurve $r n \sin \alpha = c$ erhält man aber $d\alpha = -\left(\frac{dn}{n} + \frac{dr}{r}\right) \operatorname{tg} \alpha$, somit ist $dz = d\varphi + d\alpha =$

$-\frac{dn}{n}\,tg\alpha$, und da $tg\alpha = \frac{c}{\sqrt{n^2r^2-c^2}}$, ist endlich

$$dz = -\frac{c}{\sqrt{n^2r^2-c^2}}\,\frac{dn}{n} \quad \text{oder} \quad z = \int_{n_1}^{n_0} \frac{c}{\sqrt{n^2r^2-c^2}}\,\frac{dn}{n}$$

wo n_1 der Brechungsexponent an der Grenze der Atmosphäre, n_0 der am Boden ist. Hier hat man also r als Funktion von n auszudrücken, um z und damit dann γ zu erhalten.

Mathematische Versuche in dieser Richtung findet man in den astronomischen und geodätischen Lehrbüchern.

Man hat auch versucht, die Refraktion γ empirisch darzustellen als Funktion des Winkels φ. Tatsächlich ist bis zu einer gewissen Annäherung $\gamma = K\varphi$, wo K, die Refraktionskonstante, 0,1325 beträgt. In Wirklichkeit ist aber die Beziehung zwischen γ und φ viel komplizierter.

Zur praktischen Verwendung hat man für die Größe der Refraktion γ Tabellen angelegt (Besselsche Refraktionstabelle), aus denen man für eine bestimmte scheinbare Zenithdistanz des Gestirnes die Refraktion entnehmen kann, wie sie unter normalen Verhältnissen besteht.

Wenn wir hier den Gang eines Lichtstrahles verfolgten, der von einer außerirdischen Lichtquelle kam, so hatten wir es mit der sogenannten **astronomischen Refraktion** zu tun. Liegt die Lichtquelle hingegen auf der Erde oder in deren Atmosphäre, so tritt gleichfalls die Brechung des Lichtstrahles ein, man bezeichnet die Ablenkung von der Anfangs- zur Endrichtung dann als **terrestrische Refraktion**. Der Lichtstrahl beschreibt jetzt wieder eine Kurve, für die natürlich die gleiche Bedingung gilt, wie früher. Nur hat die Ablenkung γ jetzt einen anderen Wert.

In Figur 4 bewege sich z. B. der Lichtstrahl von der Lichtquelle in B zum Beobachter in A. Er legt dabei nicht die Gerade BA zurück, sondern die nach unten konkave Kurve BA. Der Beobachter in A sieht daher B nicht in der Richtung AB, sondern in der Richtung AC, also um den Winkel α gehoben. Ebenso würde ein Beobachter in B den Punkt A um den Winkel β gehoben sehen (CB ist die Tangente an die Lichtkurve in B). Infolgedessen ist die totale Ablenkung des Strahles aus der ursprünglichen Richtung BC in die Einfallsrichtung AC gleich dem Winkel $\gamma = \alpha + \beta$. Diese totale Ablenkung γ bezeichnet man daher auch als **Totalrefraktion**; sie ist bei der astronomischen Refraktion dem α selbst gleich. Handelt es sich um einen irdischen Lichtpunkt B, so ist α die terrestrische Refraktion; da man annäherungsweise die sehr flache Lichtkurve AB als Stück eines Kreisbogens betrachten kann, so ist auch annähernd $\alpha = \beta$ und daher die terrestrische Refraktion gleich der halben Totalrefraktion.

Die terrestrische Refraktion spielt hauptsächlich bei geodätischen Messungen eine Rolle. Je größer die Distanz der Punkte AB ist, desto größer ist auch α; so ist annähernd für

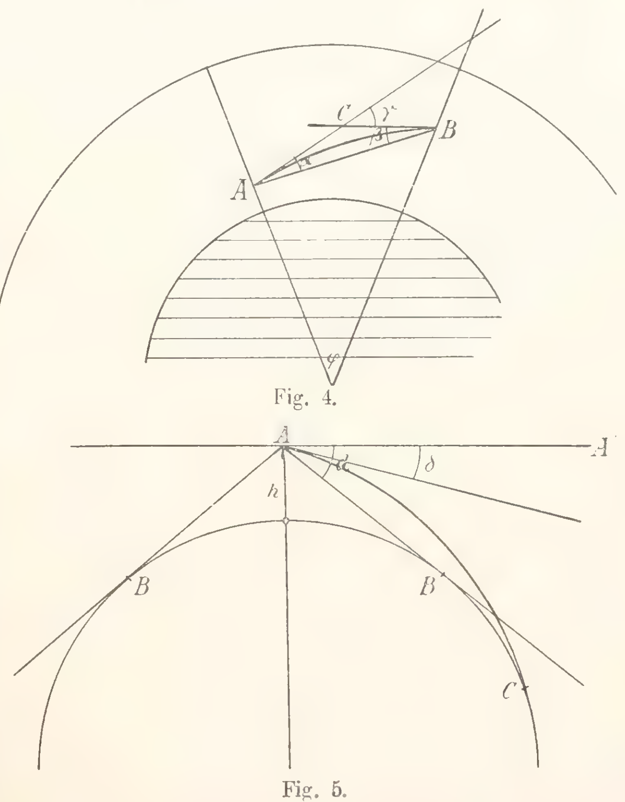


Fig. 4.

Fig. 5.

AB		α
AB =	1 km	α = 2″
„ =	4 „	„ = 8″
„ =	8 „	„ = 17″
„ =	12 „	„ = 25″
„ =	16 „	„ = 34″
„ =	20 „	„ = 42″

Die terrestrische Refraktion hat normalerweise eine Erweiterung des Horizontes zur Folge. Wegen der Kugelgestalt der Erde sieht ein Beobachter in gewisser Höhe h über der Erdoberfläche eine bestimmte Ausdehnung des Horizonts.

Sei in Figur 5 der Beobachter in A; bei geradliniger Fortpflanzung des Lichtes in der Atmosphäre würde er die Erdoberfläche

bis zum Punkte B (B′) sehen. Ein Maß für diesen Ausblick ist der Winkel d, den man als geodätische Kimmtiefe bezeichnet. Es ist $d = \sqrt{\frac{2h}{R}}$, wenn R der Erdradius ist. Infolge der Strahlenbrechung kommt aber noch der Strahl vom Punkte C der Erdoberfläche auf der Kurve CA ins Auge; man sieht also weiter, als ohne diese. Ein Maß für diesen Gesichtskreis ist der Winkel δ, die Depression des Horizontes, gebildet vom Horizont des Beobachters AA′ und der Tangente an die Lichtkurve in A. Der Horizont wird also durch die Strahlenbrechung normalerweise gehoben. Die Rechnung ergibt, daß angenähert $\delta^2 = d^2 - 2(n_0 - n)$, wenn n_0 der Brechungsexponent der Luft an der Erdoberfläche, n derselbe in der Höhe h, am Beobachtungsorte, ist. Normalerweise ist n_0 größer als n.

2a) Abnormale Strahlenbrechung. Im allgemeinen nimmt die Temperatur der unteren Luftschichten nach oben um 0,5 bis 0,7 ° C pro 100 m ab; diese Temperaturabnahme bedingt eine gewisse Abnahme der Brechungsexponenten n nach aufwärts, die wir als normale bezeichnen.

Es kommt nun vor, daß die Luft an der Erdoberfläche bedeutend kälter ist

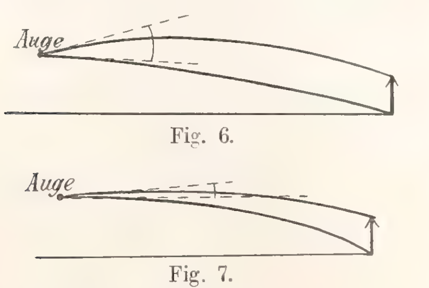


Fig. 6.

Fig. 7.

als in einiger Höhe darüber; dann ist die Dichtenabnahme nach aufwärts größer und mit ihr auch die Aenderung der Brechungsexponenten; somit wird nach der oben gegebenen Formel δ, die Depression des Horizonts, abnormal gering, der Horizont erweitert sich sehr, man sieht noch Gegenden der Erdoberfläche, die normalerweise unsichtbar sind. Daraus erklärt sich die Erscheinung der sogenannten Erhebung, bei der man z. B. entfernte Küsten oder Inseln, Städte oder Gegenstände erblickt, die sonst unsichtbar sind. So sah z. B. Latham von England aus am 26. Juli 1797 die französische Küste, die sonst nicht sichtbar ist.

Ist die Luft am Boden abnorm warm, so wird δ größer, als es normalerweise ist; denn es ist $n_0 < n$, und es entsteht eine Verengung des Horizonts durch die Strahlenbrechung. Die Lichtkurve ist dann nach unten konvex, der Beobachter sieht nicht so weit, als sonst. So glaubte man z. B. am 20./III. 1784 nachmittags aus dem Kanal von Malta eine Insel hervorsteigen zu sehen. Man fuhr auf das vermeintlich neue Land zu, um davon Besitz zu ergreifen. Nachher stellte sich diese Insel als der schneebedeckte Gipfel des Aetna heraus, der abnorm tief erschienen war, so daß seine Abhänge und die Küste von Sizilien unsichtbar wurden.

Mit der Verengung des Horizonts ist häufig verknüpft, daß entfernte Gegenstände viel größer, deutlicher und näher erscheinen als sonst. Diese Vergrößerung erklärt Pernter (a. a. O.) aus der ungleichen Gestalt der Lichtkurven, die die Lichtstrahlen, die von den beiden Enden eines großen Gegenstandes kommen, beschreiben; die ungleich verteilte Luftdichte kann in der Tat die Ursache sein, daß der Strahl, der z. B. vom unteren Ende eines Turmes kommt, weniger gekrümmt ist, als der vom oberen. Die Tangenten an diese Strahlen divergieren dann stärker als es der Größe des Gegenstandes entspricht, man sieht ihn vergrößert und daher näher. Eine umgekehrte Verteilung der Dichte kann auch eine Verkleinerung des Gegenstandes bewirken (vgl. die Figuren 6 und 7).

Der zuletzt erwähnte Fall tritt z. B. bei der scheinbaren Abplattung des auf- oder untergehenden Mondes ein. Hier wird der vertikale Durchmesser gegen den horizontalen verkleinert.

2b) Luftspiegelung. Tritt der Lichtstrahl aus einer dichteren (n_1) in eine dünnere Luftschicht (n_2), so ist $\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{n_2}{n_1}$; hier ist also $n_1 > n_2$. Sobald der Strahl so schief einfällt, daß der Brechungswinkel 90 ° beträgt, kann keine Brechung mehr erfolgen, es tritt dann Totalreflexion des Strahles an der dünneren Schichte ein. Dies ist demnach der Fall, wenn $\sin\alpha_0 = \frac{n_2}{n_1}$; daraus bestimmt sich der Einfallswinkel; da das Verhältnis $\frac{n_2}{n_1}$ immer nur um sehr weniges kleiner sein kann als 1, so folgt, daß α_0, der Einfallswinkel, nahe 90 ° betragen muß. Die Totalreflexion ist also nur bei sehr flach gegen die Trennungsfläche einfallenden Lichtstrahlen möglich. Bei der Reflexion der Strahlen tritt dann eine Spiegelung des Gegenstandes, der die Strahlen aussendet, ein. Sie kann entweder nach oben oder unten oder auch nach der Seite erfolgen, je nach der Lage der Trennungsfläche.

Die Luftspiegelung nach oben ist meist auf dem Meere gesehen worden. Da erscheint z. B. ein Schiff auf dem Meere und über ihm das umgekehrte Spiegelbild, wie dies Figur 8 andeutet. Oder man sieht

auch das Schiff selbst nur zum oberen Teil, darüber in der Luft ein aufrechtes Spiegelbild und über diesem ein zweites verkehrtes. Auch erscheint das Bild des Meeres selbst in der Luft. Diese Phänomene sind sehr variabel. Man hat solche Spiegelungen auch im Hochgebirge gesehen. Die Erklärung der oft recht komplizierten Erscheinungen gelingt stets unter Annahme bestimmter Dichteverteilungen, wenn es auch meist unmöglich ist, diese aus den Temperaturbeobachtungen unmittelbar nachzuweisen. Für die Entstehung eines doppelten Bildes ist es natürlich nötig, daß die Strahlen von jedem Punkte des Gegenstandes auf zwei Wegen ins Auge gelangen können; für ein dreifaches Bild sind drei Wege erforderlich usw. Zur Erklärung der Erscheinung in Figur 8 dient Figur 9. Hier ist der normale Strahlengang (a_0b_0) durch gerade Linien angedeutet; auch dieser wird in Wirklichkeit etwas nach oben gekrümmt sein. Der Punkt A sendet außerdem einen Strahl über a ins Auge, dessen Tangente ist a', so daß der Punkt A in A' nochmals erscheint. Das analoge gilt von B. In Figur 9 schneiden sich die Kurven a und b, hierdurch entsteht das verkehrte Spiegelbild. Erfolgt nach den vorhandenen Dichteverhältnissen dies Schneiden nicht, so entsteht ein aufrechtes Bild. Es handelt sich bei der Luftspiegelung nach oben stets um ein besonders starkes Dichtegefälle nach oben. Der schief aufwärtsgehende Strahl wird herabreflektiert. Bei der L u f t s p i e g e l u n g n a c h u n t e n ist das Umgekehrte der Fall. Ist die Luft an der Erdoberfläche dünner als nahe darüber, so kann ein von oben schief einfallender Strahl sie nicht passieren, sondern wird hinaufreflektiert. Man sieht dann also hochgelegene Gegenstände tiefer liegen, während bei der Luftspiegelung nach oben die Gegenstände vom Horizont hinaufgehoben werden.

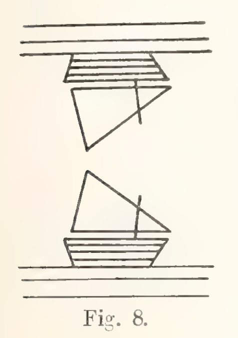


Fig. 8.

Am häufigsten wurde die Luftspiegelung nach unten in Steppen beobachtet, wo die Temperatur an der Erdoberfläche sehr hoch wird, so namentlich in Ungarn. Man sieht z. B. eine Wasserfläche vor sich, die bei Annäherung sich zurückzuziehen scheint und nie erreicht wird. Ueber sie ragen Bäume oder Türme vor, die tatsächlich vorhanden sind, eine Erscheinung, die in Ungarn Delibab genannt wird. Diese Wasserflächen, die so oft gesehen werden und als Steppen- oder Wüstengesicht (Serab) bekannt sind, sind Spiegelbilder des Himmels, erzeugt an der warmen Luftschichte direkt über dem Boden. Auch auf dem Meere hat man die Erscheinung beobachtet. Die Spiegelbilder sind aufrecht oder verkehrt, wie bei der Spiegelung nach oben.

Schließlich wurden, wenn auch seltener, noch L u f t s p i e g e l u n g e n n a c h d e r S e i t e beobachtet. Sie entstehen, wenn ein Dichtegefälle in der Horizontalen vorhanden ist und an einer also vertikal stehenden Trennungsfläche die Totalreflexion eintritt. So sah z. B. J u r i n e am Genfersee ein Segelschiff sich entfernen; plötzlich löste sich von diesem ein zweites ab und fuhr nach der anderen Seite wie jenes. Diese Spiegelbilder sind stets aufrecht, doch ist rechts mit links vertauscht.

Sind die Dichteverhältnisse, die die abnormen Spiegelungen erzeugen, nicht konstant, sondern raschen Schwankungen unterworfen, so werden die Erscheinungen zeitlich veränderlich. Man kann sich vorstellen, daß die Luftschichten ungleicher Dichte hin- und herwogen, sich in unabsehbarer Weise verlagern. Dann entstehen die auffallendsten hierher gehörigen Erscheinungen, die F a t a M o r g a n a, M u t a t e, L a v a n d a j a usw. Eine gewöhnliche Fensterglastafel gibt eine gute Vorstellung von der Entstehung dieser Erscheinungen. Sie enthält sogenannte Schlieren, die die Gegenstände, die man hindurch sieht, verzerren. Fährt man vor einer solchen Tafel mit dem Kopfe hin und her, so sieht man die Gegenstände sich in der unregelmäßigsten Weise fortwährend verändern. Für die Fata Morgana ist erstens diese wechselnde Verzerrung charakteristisch, zweitens die große Vervielfältigung, die ein Gegenstand erleidet. So glaubt man z. B. anstatt einiger Soldaten ein Heer, anstatt einiger Kühe eine ganze Herde zu sehen. Besonders häufig ist auch der Anblick einer Stadt mit vielen Häusern und Türmen, die sich fortwährend verändern, beschrieben worden. In Wirklichkeit sind einige Häuser oder Türme genügend, um diese Erscheinung hervorzurufen. Die Bedingung für die Vervielfältigung der Bilder ist die, daß die Strahlen von einem Punkte auf sehr

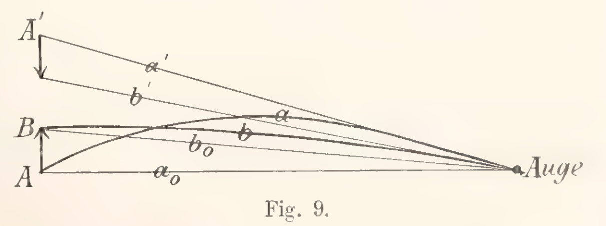


Fig. 9.

vielen verschiedenen Wegen ins Auge gelangen können. Dies kann z. B. sein, wenn die Trennungsfläche zweier Luftschichten, an denen die Spiegelung eintritt, gewellt ist. Auch auf einem gewellten See sieht man die Sonne z. B. nicht einmal gespiegelt, sondern es ist ein langer Spiegelstreifen vorhanden. So hat man anzunehmen, daß die Fata Morgana und die verwandten Erscheinungen durch eine fortwährende Gestaltsänderung jener Schichten ungleicher Dichte zustandekommen, daß diese Schichten nicht eben sondern in mannigfacher Weise gewellt sind und an ihnen Spiegelungen nach oben, nach unten und nach der Seite vorkommen.

2c) Scintillation. Die Scintillation besteht in einer Zitterbewegung entfernter Lichtquellen, die man leicht beobachten kann. Am bekanntesten ist das Funkeln der Sterne, bei denen nicht nur Zitterbewegungen auftreten, sondern auch ein rascher Wechsel in Helligkeit und Farbe auffällt. Bei entfernteren irdischen Lichtquellen ist die Scintillation gleichfalls zu sehen; sie erscheint auch über sonnenerwärmten Wiesen und äußert sich hier in einer Zitterbewegung aller sichtbaren, etwas entfernteren Gegenstände. Mit freiem Auge sieht man die Erscheinung am besten an Fixsternen, weniger oder gar nicht an Planeten. Doch ist sie auch an diesen mit dem Fernrohr nachweisbar, ja selbst an den Rändern von Sonne und Mond vorhanden. Die Scintillation der Fixsterne ist am größten, wenn diese nahe dem Horizonte stehen, und wird gegen den Zenith viel kleiner. Wird eine weiße Wand von einem hellen Planeten oder der Mondsichel erleuchtet, so kann man in deren Helligkeit lebhafte Undulationen sehen, die man als fliegende Schatten bezeichnet. Sie sind die objektiven Effekte der Helligkeitsschwankungen der Scintillation.

Die Erscheinung der Zitterbewegung wird durch raschen Wechsel des Lichtweges hervorgebracht, auf dem die Strahlen vom Gegenstand ins Auge gelangen. Dieser Wechsel rührt von fortwährenden Dichteänderungen in der Atmosphäre her, die die Strahlenbrechung beeinflussen. Ein Maß für die Zitterbewegung ist die Größe des Kreises, als der ein Fixstern in einem Fernrohr erscheint. Durch die fortwährende Veränderung des Strahlenganges wird nämlich im Fernrohr kein Lichtpunkt erzeugt, sondern ein sogenannter Zerstreuungskreis, der um so größer ist, je größer die Zitterbewegungen sind. Hierdurch wird der auflösenden Kraft der Fernrohre ein Hindernis in den Weg gelegt; man sucht daher für Sternwarten Orte, die geringe Scintillation besitzen; sie haben ein günstiges „optisches Vermögen des Ortes".

Da der Brechungsexponent für Strahlen verschiedener Wellenlänge verschieden ist, so werden die Lichtstrahlen auf dem Weg durch die Atmosphäre in ihre Spektralfarben zerlegt. Hierdurch wird die Scintillation farbig. Käme nur ein Strahl vom Stern zur Erde, so würde nur ein bestimmter Farbenkomplex aus dem Spektrum ins Auge gelangen können; z. B. einer aus dessen rotem Teile. Nun verläuft aber neben dem ersten ein zweiter Strahl, der gleichfalls in seine Farben zerlegt wird. Diese decken sich teilweise mit jenen des ersten, so daß eine Farbenmischung entsteht. Tatsächlich kommen von vielen verschiedenen Strahlenbüscheln Strahlen ins Auge und so würden sich alle Farben wieder zu weiß ergänzen, der Stern erschiene farblos. Durch die fortwährenden raschen Schwankungen der Luftdichte, die leicht durch die in der Höhe stets vorhandenen Winde erklärlich sind, vereinigen sich aber nun all diese Strahlen nicht tatsächlich zu weiß, sondern geben die verschiedensten schwankenden Farbenmischungen ab. Es gehen nämlich nach Montignys Prinzip die verschieden gefärbten Strahlen, die gleichzeitig ins Auge treffen, nach oben immer mehr auseinander, wo sie Luftschlieren verschiedenster Art passieren; hierdurch wird bald diese, bald jene Farbe abgelenkt, es erscheint nicht nur ein wechselnd gefärbtes, sondern auch ein wechselnd helles Bild des Sternes.

Mit Hilfe der Brechungsexponenten der roten und violetten Strahlen ergibt eine Rechnung, daß der rote Strahl, der gleichzeitig mit einem violetten an der Erdoberfläche ins Auge des Beobachters gelangt, an der Grenze der Atmosphäre von diesem ziemlich weit entfernt ist. Diese Distanz verringert sich allmählich in der Atmosphäre und zwar in folgender Weise für verschiedene Abstände des Sternes vom Zenith (z):

		Höhe über der Erdoberfläche				
z	Rot-Violett	1 km	5 km	10 km	40 km	Grenze der Atmosphäre
60°	Distanz in cm	—	5,3	8,3	11,6	11,7
80°	„	15,1	57,9	91,5	127,3	128,3
88°	„	150,9	580,1	915,4	1273,0	1283,0
90°	„	441,8	1698,0	2680,0	3727,0	3756,3

Brechungsexponent der B-Linie, rot, 1,000 2908; der $\frac{G+H}{2}$ Linie, violett, 1,000 2967.

Figur 10 veranschaulicht den Gang des roten und den des violetten Strahles, die gleichzeitig das Auge treffen. Ihr Abstand ist die oben angegebene Distanz in Zentimetern.

Man hat nun gefunden, daß zwei Strahlen schon in einer Distanz von nur wenigen Zentimetern unabhängig voneinander „scintillatorisch modifiziert" werden. Es rührt dies daher, daß die Luftschlieren selbst von dieser Größenordnung sind. Man erhält also überall farbige Scintillation, wo dieser Abstand einige Zentimeter beträgt, die Farben fehlen daher für alle Sterne, die

Fig. 10.

näher als etwa 50° am Zenith liegen; dies bestätigen auch die Beobachtungen.

Die Luftschlieren hat man sich als fortwährend veränderliche mit dem Winde fortgetragene Verdichtungs- und Verdünnungsstellen in der Luft zu denken. Sie beeinflussen ein Strahlenbüschel, das auf sie einfällt, in der Weise, daß die ursprünglich ebene Wellenfläche unregelmäßig gewellt wird. Man kann (nach K. E x n e r) diese Aus- und Einbuchtungen der Wellenfläche sogar messen und die Größe der Schlieren bestimmen. Jene Unebenheiten in der Wellenfläche sind von der Größe eines Quadratdezimeters, die Erhebung oder Vertiefung beträgt weniger als $^1/_{1000}$ mm, der Krümmungsradius nicht unter 1800 m. Einer Erhabenheit der Wellenfläche entsprechen divergierende Strahlen, einer Vertiefung konvergierende, somit werden die Helligkeiten ungleiche; dieser Unterschied wächst natürlich mit der Entfernung und erreicht z. B. bei Krümmungsradien von 6000 m schon 100 % in 1 km Distanz von jener Wellenfläche.

3. Erscheinungen, die durch Eiskristalle und Wassertropfen erzeugt werden. Die Wirkung der Kondensationsprodukte des Wassers in der Atmosphäre auf die Lichtstrahlen besteht in den physikalischen Vorgängen der Brechung, Reflexion und Beugung.

3a) H a l o - E r s c h e i n u n g e n. Sie entstehen durch Brechung und Reflexion des Lichtes an den Eiskristallen, die in der Luft schweben. Ein eigentliches Schweben derselben ist allerdings nicht vorhanden, doch fallen diese kleinen Körper infolge des Luftwiderstandes so langsam, daß man immerhin von Schweben sprechen kann. Das Wasser kristallisiert nach dem hexagonalen System; seine Grundform ist das sechsseitige Prisma, bei dem die Höhe des Prismas die Lage der Hauptachse, die 3 Diagonalen der einander gegenüberliegenden Eckpunkte des Sechsecks die 3 Nebenachsen vorstellen.

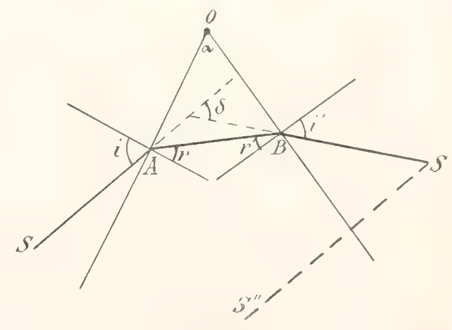


Fig. 11.

Die in der Atmosphäre vorkommenden Eiskristalle zerfallen in zwei Hauptarten; bei der ersten ist der Kristall in der Richtung der Hauptachse am größten, bei der zweiten in der Richtung der Nebenachsen; die erste Art ist also säulenförmig, die zweite plättchenförmig. Bei der ersten Form kommen pyramidenartige Aufsätze auf den Endflächen vor, bei der zweiten die mannigfachsten sternförmigen Entwickelungen nach den 3 Nebenachsen. Ueberhaupt ist die Form der Eiskristalle sehr mannigfaltig; eine Klassifikation und Bilder davon findet man bei P e r n t e r (a. a. O.).

Die Richtung der hauptsächlichen Größenentwickelung der Kristalle, nach der Haupt- oder den Nebenachsen, ist darum wichtig, weil sich nach ihr die Lage richtet, in der die Kristalle durch die Luft fallen (schweben). Dieses Fallen geschieht nämlich nach der Richtung des größten Luftwiderstandes. Säulen fallen daher mit ihrer Längenrichtung, Plättchen und Sterne mit ihrer Basis hori-

zontal. Doch behalten die Kristalle diese mittleren Lagen nicht andauernd bei, sondern es erfolgt ein fortwährendes Schwanken um horizontale Achsen, wohl auch ein Drehen um vertikale Achsen, ähnlich wie ein Blatt Papier aus größerer Höhe zu Boden fällt.

Die Brechung eines Lichtstrahles in einem optischen Prisma aus Eis erfolgt nach dem gewöhnlichen Brechungsgesetz in der folgenden Weise: Wir nehmen hier an, daß der einfallende Strahl senkrecht zur brechenden Kante liege. In Figur 11 liege in O die brechende Kante, OA und OB sind die Schnittlinien der Kristallflächen mit der Papierebene. Der Strahl fällt aus S in A ein, wird zum Lot gebrochen, geht im Kristall bis B und wird dort vom Lot nach S' gelenkt. Totalablenkung δ. Es ist $\frac{\sin i}{\sin r} = n$, $\frac{\sin i'}{\sin r'} = n$, wo n den Brechungsexponent des Eises bedeutet. Er beträgt für verschiedene Strahlen

Mitte	des	Rot	1,307
,,	,,	Orange	1,3085
,,	,,	Gelb	1,3095
,,	,,	Grün	1,3115
,,	,,	Blau	1,315
,,	,,	Violett	1,317

Der mittlere Exponent (für Weiß) ist $n = 1{,}31$. Man findet aus der Figur $\delta = i + i' - (r + r')$. Nun ist aber $r + r' = \alpha$, wenn α der konstante brechende Winkel des Eiskristalls, somit auch $\delta = i + i' - \alpha$. Diese totale Ablenkung δ hat nun bei einem bestimmten Einfalls- und Ausfallswinkel i und i' einen kleinsten Wert. Und zwar findet man mit Hilfe der obigen beiden Beziehungen für die Brechungswinkel, daß für $i = i'$ δ ein Minimum ist: $\delta_0 = 2i - \alpha$ (die Ableitung ist in den Lehrbüchern der Optik zu finden). Dieser Fall der Minimumablenkung hat nun für die Erscheinungen der Halos eine besondere Bedeutung und zwar aus folgendem Grunde: Fallen die parallelen Sonnenstrahlen (SA, S''S') auf die Eiskristalle (vgl. Fig. 11), so werden sie durch diese in eine andere Richtung gebrochen; der Ablenkungswinkel ist δ. Das Auge in S' erhält somit aus der Richtung BS' von dem hier betrachteten Kristall einen Strahl zugesandt. Das Auge sieht aber gleichzeitig die Sonne in einer zu AS parallelen Richtung S''S'. Der eine Kristall erzeugt also im Abstand δ von der Sonne ein Nebenbildchen von ihr. Nun sind unzählige Eiskristalle in der Luft vorhanden und alle verschieden zu den Sonnenstrahlen orientiert, so daß der Einfallswinkel i alle möglichen Werte hat und somit auch δ für jeden Kristall ein anderes ist. Das Auge muß also eigentlich eine Unzahl solcher Sonnenbildchen nebeneinander sehen, in allen physikalisch möglichen Distanzen δ von der Sonne, bei denen der Strahl das Prisma passieren kann. Eine kurze Rechnung lehrt nun, daß in der Minimumablenkung δ_0 die Lichtintensität weitaus am größten sein muß, da von den ganz willkürlich orientierten Kristallen gerade in diese Richtung δ_0 besonders viele Strahlen gesendet, sie dahin geradezu konzentriert werden.

Die totale Ablenkung ergab sich oben zu $\delta = i + i' - \alpha$; man findet nun aus den obigen Gleichungen für i' den Wert

$$\sin i' = \sin\alpha \sqrt{n^2 - \sin^2 i} - \cos\alpha \sin i;$$

es kann somit in der Gleichung für δ das i' durch α und i ersetzt werden. Da α bei den Kristallen konstant ist, so folgt δ als Funktion von i allein; d. h. es entspricht jedem Einfallswinkel i eine bestimmte Ablenkung δ

$$\delta = i + \arcsin\left(\sin\alpha \sqrt{n^2 - \sin^2 i} - \cos\alpha \sin i\right) - \alpha$$

Die Kristalle sind ganz regellos gegen die parallelen Sonnenstrahlen orientiert und in sehr großer Zahl vorhanden. Es werden also alle möglichen Einfallswinkel i ungefähr in der gleichen Zahl vorkommen. Betrachten wir jene Eiskristalle, die zufällig so orientiert sind, daß die Einfallswinkel bei ihnen zwischen i und $i + di$ liegen. Ihre Zahl wird dem gewählten Intervall di proportional sein, z. B. a di, wo a offenbar von der Zahl der überhaupt vorhandenen Kristalle abhängt. Diese Zahl von Eiskristallen wird die Lichtstrahlen um der Größe nach sehr ähnliche Ablenkungswinkel δ ablenken. Ihre Grenzwerte werden einerseits δ, andererseits $\delta + d\delta$ sein; d. h. alle Strahlen, die diese Kristalle treffen, werden abgelenkt um Winkel, die zwischen δ und $\delta + d\delta$ liegen. Die Zahl dieser Strahlen ist die gleiche geblieben wie oben, a di. Nun ist aber nach der obigen Formel

$$di = \frac{\cos i'(\sin i' + \cos\alpha \sin i) . d\delta}{\cos i'(\sin i' + \cos\alpha \sin i) - \cos i (\sin i + \cos\alpha \sin i')} = \varphi . d\delta,$$

wie sich durch Differentiation ergibt. Wird dieser Wert von di in adi, die Zahl der Strahlen, eingesetzt, so ergibt sich hierfür $\alpha\varphi d\delta$, wo φ der obige Bruch ist. Da, wie oben gesagt, nun die Ablenkungswinkel dieser Strahlen zwischen δ und $\delta + d\delta$ liegen und ihre Zahl gleich geblieben ist, so bedeutet offenbar $\alpha\varphi d\delta$ auch die Zahl der abgelenkten Strahlen, deren Ablenkungswinkel zwischen δ und $\delta + d\delta$ liegen. Diese Zahl ist nun nicht mehr konstant, sondern hängt von i und i' ab. Und zwar hat offenbar der Ausdruck φ für ungleiche Werte von i und i' einen endlichen Wert, während er für den Fall, daß $i = i'$, unendlich wird: dann wird nämlich der Nenner von φ zu Null. Physikalisch heißt dies: im Falle, daß i nahezu gleich i', ist die Zahl der Strahlen mit Ablenkungswinkeln, die sich nur wenig (um $d\delta$) voneinander unterscheiden, ganz ungleich viel größer, als wenn $i \gtrless i'$. Die Bedingung $i = i'$ ist aber die der minimalen Ablenkung. Wir erhalten also von jenen Kristallen, die zufällig gerade so in der Luft schweben, daß die minimale Ablenkung δ_0 durch sie erfolgt, die abgelenkten Strahlen an einen Ort konzentriert, was nicht gilt für die Strahlen, bei denen $\delta > \delta_0$. Aus diesem Grunde kann man

erwarten, im Sonnenabstand, der δ_0 entspricht, ein viel lichtstärkeres Bild der Sonne zu erhalten, als sonst irgendwo.

Wir haben nunmehr die Eiskristalle auf diese Minimalablenkungen hin zu untersuchen. Bei den zwei Hauptformen, dem Prisma und dem Plättchen kommen verschiedene brechende Winkel in Betracht. Liegt der einfallende Strahl in der Ebene der Hauptachse, so ist der brechende Winkel 90°, liegt er in der Ebene der Nebenachse, so beträgt er 120°. Dies zeigen die folgenden Figuren für die Durchschnitte durch das rechtsseitige Prisma. In Figur 12 a ist die Brechung eines Strahles durch das 90 gradige Prisma gezeichnet für den Fall, daß $i = i'$ (minimale Ablenkung). Da in diesem Falle $\delta = 2i - \alpha$, ist $\frac{\delta + \alpha}{2} = i$. Nun ist auch $r + r' = \alpha = 2r$, also $r = \frac{\alpha}{2}$, weiter $\sin i = n \sin r$ und daher $\sin \frac{\delta + \alpha}{2} = n \sin \frac{\alpha}{2}$. Setzt man also $\alpha = 90^0$, so ergibt sich für den Fall der Figur 12 a $\delta_0 = 45^0\, 44'$, wenn für n der mittlere Wert 1,31 gesetzt wird.

Setzt man in obiger Formel $\alpha = 120^0$- was der brechende Winkel für 2 aneinander stoßende Kanten des gleichseitigen Sechsecks ist, so erhält man für $\sin \frac{\delta_0 + \alpha}{2}$ einen Wert, der größer ist als 1. Dies hat keinen Sinn; es kann also ein brechender Winkel von 120° im Eiskristall keinen Strahl durchlassen.

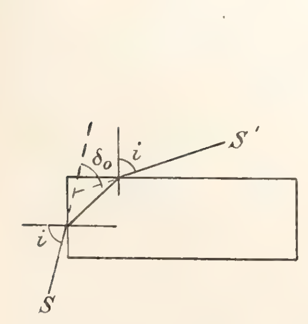


Fig. 12a.

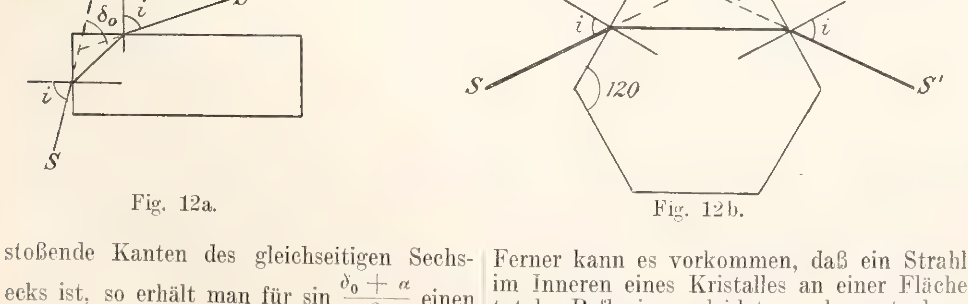


Fig. 12 b.

Hingegen erhält man einen brauchbaren brechenden Winkel im Sechseck (Fig. 12 b), wenn man 2 durch eine Seite des Sechsecks getrennte Seiten in Betracht zieht. Die brechende Kante fehlt dann, sie liegt außerhalb des Kristalls im Punkte A. Der Strahl verfolgt den in der Figur mit SS' bezeichneten Weg bei der minimalen Ablenkung. Setzt man $\alpha = 60^0$, so ergibt sich eine Ablenkung $\delta_0 = 21^0 50'$.

Dies sind die beiden wesentlichsten Ablenkungen, die durch Eiskristalle hervorgebracht werden. Es kommt nun aber natürlich häufig vor, ja, es wird sogar die Regel sein, daß die einfallenden Sonnenstrahlen nicht in der Ebene liegen, die senkrecht zur brechenden Kante steht, wie wir es bisher annahmen. Auch dann gibt es eine minimale Anlenkung δ_1, sie wird wie die Rechnung lehrt, größer als obiges δ_0. Die Ablenkung δ_0' in der Horizontalebene ist dann gegeben durch $\sin \frac{\delta_0' + \alpha}{2} = n \cdot \frac{\cos k}{\cos h} \sin \frac{\alpha}{2}$, wobei $\frac{\sin h}{\sin k} = n$. Der Ablenkungswinkel δ_0', bezogen auf einen durch die Lichtquelle laufenden Horizontalkreis, ist also vergrößert gegen den Fall, daß die Lichtquelle im Horizont steht: die totale Ablenkung δ_1 ist schließlich $\sin \frac{\delta_1}{2} = \cos h \sin \frac{\delta_0'}{2}$.

Neben diesen Brechungen an Kanten von 60° und von 90° können noch zahlreiche andere vorkommen, wie z. B. wenn auf den Enden des säulenförmigen Prismas Pyramiden oder Pyramidenstumpfe aufsitzen Ferner kann es vorkommen, daß ein Strahl im Inneren eines Kristalles an einer Fläche totale Reflexion erleidet, es kommt dann also Brechung und Reflexion in Betracht. Hierdurch kommen wieder neue Ablenkungswinkel zustande, die wir hier nicht näher betrachten können (vgl. Pernter a. a. O.). Doch ist noch der einfache Fall zu erwähnen, wo die Strahlen an Kristallflächen nur reflektiert werden, ohne irgendwelche Brechungen zu erleiden. Solche Reflexionen ergeben weißes Licht, im Gegensatz zu den farbigen Erscheinungen bei der Brechung.

Die gewöhnlichsten Halo-Erscheinungen

sind in Figur 13 dargestellt. Außer ihnen gibt es eine große Zahl von besonderen, seltenen Phänomenen ähnlicher Art, die hier übergangen werden müssen.

S ist die Sonne; rechts und links von ihr sind 2 Bilder derselben (S_1), Nebensonnen, in einem Abstand, der 22° oder etwas mehr beträgt. Steht die Sonne im Horizont, so ist der Abstand 22°, steht sie höher, ist ihr Abstand etwas größer. Diese Nebensonnen sind auffallend helle Stellen am Himmel, die auf der der Sonne zugekehrten Seite rot, dann gelb, grün gefärbt sind und nach außen in einen weißlichen Schweif auslaufen. Sie erklären sich durch die in der Luft schwebenden Kristallplättchen und Sterne; Brechungswinkel 60°, minimale Ablenkung 22°. Rot wird weniger abgelenkt, liegt daher innen. Im Abstand von 22° von der Sonne verläuft um diese herum ein heller Kreis, der Halo von 22°, oder innere kleine Halo. Er wird erzeugt durch jene fallenden Plättchen, die den Strahlen eben die Minimumablenkung bei $\kappa = 60°$ ermöglichen. Da die horizontale Lage der Plättchen bevorzugt ist, so sind die Nebensonnen S_1 um vieles heller als dieser Halo. Steht die Sonne über dem Horizont, so fallen die Strahlen schief auf die horizontalen Plättchen, der Ablenkungswinkel ist daher nach dem oben gesagten größer. Tatsächlich rücken auch die Nebensonnen bei steigender Sonne aus dem Halo von 22° heraus. Die weißlichen Schweife, die von ihnen nach außen verlaufen, erklären sich aus der Brechung jener Strahlen, die nicht im Minimum der Ablenkung einfallen. Auch der Halo von 22° ist, wie die Nebensonnen, innen rot, dann gelb, grün. Die Farben sind aber weniger intensiv. An ihm sieht man oben und unten hörnerartige Fortsätze, die oberen und unteren Berührungsbögen des Halo von 22°. Sie erklären sich aus einem Pendeln der Kristalle um ihre normale Lage. Die oberen und unteren Berührungsbögen können sich bei steigender Sonne um den Halo von 22° herumschließen, so daß ein neuer, diesem umschriebener Halo entsteht. Auch seitliche Berührungsbögen jenes Halo wurden beobachtet.

In ganz analoger Weise entstehen nun ähnliche Erscheinungen in einer Sonnendistanz von etwa 46°, und zwar durch säulenförmige Kristalle, deren Längsrichtung beim Fallen annähernd horizontal liegt. Die brechenden Winkel sind hier 90°, die minimale Ablenkung nach obigem 46°. Es entstehen also zunächst durch die horizontalen Säulchen 2 Nebensonnen von 46°; diese sind bisher nur sehr selten gesehen worden. Ferner entsteht um die Sonne herum durch die verschiedenst orientierten Kristalle mit 90°-brechendem Winkel ein zweiter Halo, der von 46° oder der große Halo. Auch dieser ist nicht gerade häufig, innen rot, gegen außen gelblich und grünlich. Von ihm sieht man meist nur einzelne Bogenstücke. Seine Breite ist etwa die doppelte jenes von 22°. An den großen Halo schließen sich ähnliche Berührungsbögen wie an den kleineren an, die meist auch nur teilweise sichtbar sind. Alle diese Bögen haben auf der Sonnenseite eine rote Färbung und sind bedeutend breiter als die analogen kleineren.

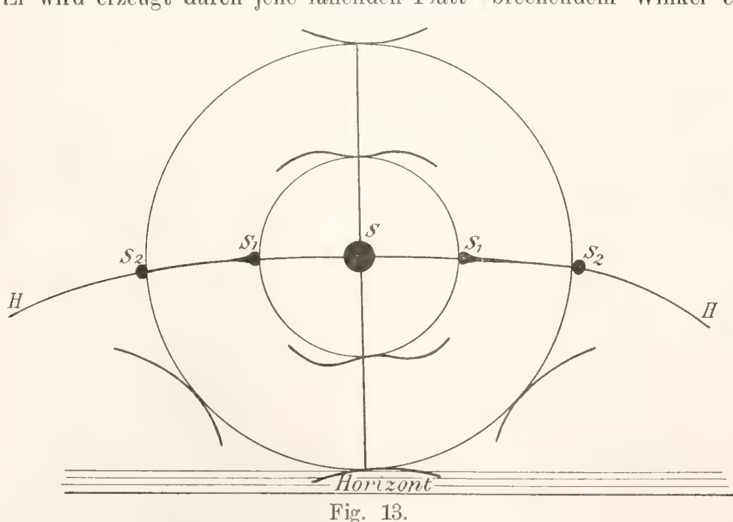


Fig. 13.

Schließlich ist in Figur 13 der Horizontalkreis oder Nebensonnenring perspektivisch angedeutet (HSH). Es ist dies ein weißer Kreis, der sich in der Höhe der Sonne horizontal um den ganzen Himmel herumzieht. Er entsteht nicht durch Brechung, sondern durch Reflexion.

In Figur 14 bedeutet K die Fläche eines Eiskristalls, die eben der Sonne zugekehrt ist. Die Sonne steht in der Höhe h über dem Horizont HH'; dann erhält der Beobachter in A aus S die direkten Sonnenstrahlen und aus der gleichen Höhe h die reflektierten Strahlen KA. Er erblickt also den Horizontalkreis. Der Horizontalkreis ist nahe der Sonne am hellsten.

Wie nun die Nebensonnen S_1 und S_2 auf

ihm liegen, finden sich auch noch andere durch Helligkeit bevorzugte Stellen auf ihm, so die Gegensonne, ein heller Fleck in 180° Abstand von der Sonne auf dem Horizontalkreis. Sie entsteht durch Brechung und 2 malige innere Reflexion des Strahles im Kristall, wodurch eine Ablenkung des Strahles um 180° hervorgerufen wird. Durch ähnliche innere Reflexionen, verbunden mit Brechung, wird ferner eine Nebengegensonne

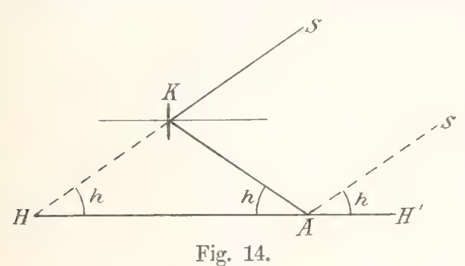


Fig. 14.

in 60° Abstand von der Gegensonne auf dem Horizontalkreis erzeugt; sie ist gleichfalls farblos; weiters eine Nebengegensonne in 90° Abstand, die an den Durchschnittspunkten eines sehr seltenen Halo von 90° mit dem Horizontalkreis liegt. Auf die Beschreibung und Erklärung dieser und noch vieler anderer seltenen Erscheinungen kann hier nicht eingegangen werden.

Schließlich seien noch die Lichtsäulen und Lichtkreuze erwähnt; jene sind helle, oft sehr stark leuchtende Streifen, die von der Sonne vertikal nach aufwärts, seltener nach abwärts verlaufen und bis höchstens 15° über diese hinaufreichen. Durch den hinzutretenden Horizontalkreis entstehen die Kreuze, deren Schnittpunkt die Sonne ist. Die Säulen erklären sich als Spiegelungen an den Basisflächen der Plättchenkristalle. Dadurch daß sie sichtbar werden können, ehe die Sonne über dem Horizont steht, und dann oft rot gefärbt erscheinen, erregen sie in hohem Maß die Aufmerksamkeit des Beobachters.

3b) Kränze. Unter Kränzen oder Höfen kleiner Art versteht man farbige Ringe um Sonne und Mond mit viel kleinerem Radius als bei den Halos; um die Lichtquelle schließt sich unmittelbar ein farbiger Hof, die Aureole, die innen, sonnenwärts, bläulich, außen rot gefärbt ist; an diesen schließen sich unter günstigen Umständen noch mehrere farbige Ringe, die stets innen bläulich, außen rot sind. Um die Sonne sieht man die Erscheinung seltener als um den Mond, doch nur, weil man durch erstere leicht zu sehr geblendet ist, um die mäßigen Helligkeiten der Kränze zu bemerken.

Die Kränze entstehen durch Beugung der Sonnen- oder Mondstrahlen an den Eiskristallen und Wassertropfen. Man sieht die Erscheinung tatsächlich nur bei bewölktem Himmel, bei klarem fehlt sie. Wenn parallele Strahlen durch eine kleine, z. B. kreisrunde Oeffnung fallen, so treten sie hinter ihr auseinander und pflanzen sich in Richtungen fort, die mit der Einfallsrichtung einen kleinen Winkel, den Beugungswinkel bilden. Die Lichtintensität dieses nach außen gebeugten Lichtes ist aber nicht konstant, auch nimmt sie nicht etwa gleichmäßig nach außen ab, sondern es entstehen Stellen, in denen die Helligkeit klein und solche, in denen sie groß ist, Minima und Maxima der Lichtintensität, und zwar durch Interferenzen, worauf wir hier nicht näher eingehen können. An der Stelle eines Minimums ist bei monochromatischem Licht die Lichtstärke überhaupt Null. Für die Lage der Minima findet man bei einer kreisrunden Oeffnung vom Radius r die Formel $\sin\vartheta = (n + 0{,}22)\frac{\lambda}{2r}$. Hier bedeutet λ die Wellenlänge des Lichtes und n die Nummer des Minimums, so daß das innerste mit 1, das zweite mit 2 usw. bezeichnet wird.

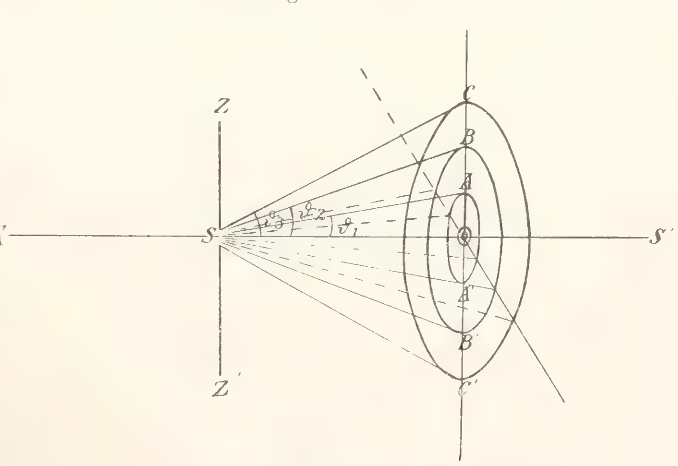


Fig. 15.

In Figur 15 ist die Entstehung der Beugungsringe AA', BB', CC' dargestellt. Der Spalt S, durch den die Strahlen aus X einfallen, beugt das Licht kegelförmig auseinander. Es entstehen unter den Beugungswinkeln ϑ_1, ϑ_2, ϑ_3 dunkle Ringe, die Minima,

für die obige Formel gilt. Ihr Mittelpunkt O, liegt stets auf der Geraden XSS′. Diese Beugungsringe können auch objektiv, auf einem Schirm, dargestellt werden. Da nach obiger Formel $\sin\vartheta$ von λ, der Wellenlänge, abhängt, werden die Ringe farbig. Für Rot ist die Wellenlänge λ größer, als für blau, daher wird rot stärker abgelenkt und liegt außen, im Gegensatz zur Lichtbrechung. Bei weißem einfallenden Licht decken sich daher die verschiedenen Farben nicht, es entstehen Mischfarben in den zwischen den Minimis gelegenen Räumen der maximalen Intensitäten, also farbige Ringe mit Rot außen, Blau innen. Der innerste Ring ist ein Kreis, in dessen Mittelpunkt die Lichtquelle erscheint, wenn sich das Auge in S′ befindet.

Es ist nun gleichgültig, ob das Licht durch eine kleine Oeffnung S tritt und sonst vom Schirme ZZ′ abgehalten wird, oder ob es durch die Fläche ZZ′ tritt und nur von einer kleinen kreisrunden Fläche S abgehalten wird. Man erhält daher die gleiche Erscheinung, wie oben, wenn man sich den Schirm ZZ′ wegdenkt und statt der Oeffnung S einen Wassertropfen denkt, an dem dann die Beugung eintritt. Ferner werden die Helligkeitsunterschiede der Maxima und Minima (helle und dunkle Ringe) um so größer, je mehr beugende Körperchen sich den Strahlen XS in den Weg stellen. Eine Wolke enthält eine sehr große Zahl Wassertröpfchen oder Eiskristalle. Diese haben keinen kreisförmigen Querschnitt; es wird hierdurch der Durchmesser der Ringe etwas verändert, doch bleibt die Erscheinung im Wesen die gleiche. Die große Zahl der Wolkenelemente bedingt daher große Intensität der Erscheinung, die genügt, um wahrgenommen zu werden. Nötig für ihr Zustandekommen ist aber, daß die Teilchen, an denen die Beugung geschieht, gleich groß sind. Denn für größere Teilchen ist der Beugungswinkel kleiner als für kleine; es würde bei ungleicher Größe also keine Verstärkung der Erscheinung durch die Zahl der Teilchen eintreten.

Die Intensität der Maxima nimmt nach außen ziemlich rasch ab. Infolgedessen sieht man meist nur die innere Aureole, das erste Maximum, eine Scheibe um die Lichtquelle; mitunter dann außerdem das zweite Maximum den ersten Ring, getrennt von der Aureole durch das erste Minimum. Doch sind auch schon vier und mehr Ringe gesehen worden.

Bedecken die Wolken nicht die ganze Fläche der Ringe am Himmel, sondern sind nur Wolkenfetzen vorhanden, so sieht man nur Teile der Ringe. Die Wolken erscheinen dann in Farben, man nennt sie *irisierende Wolken*.

Diese Beugungserscheinungen sind künstlich nachgeahmt worden. Die Theorie stimmt genau mit den Beobachtungen.

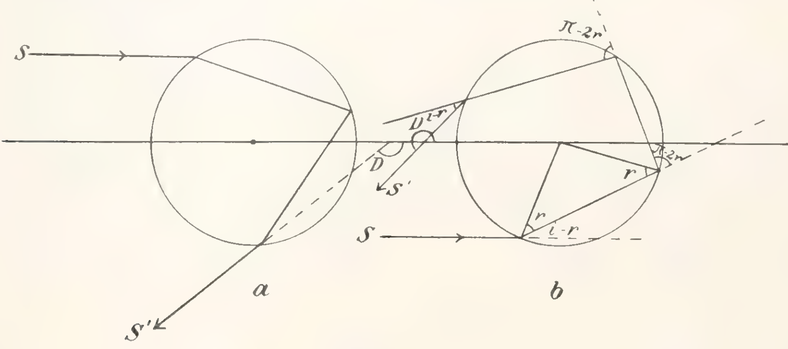


Fig. 16.

Einen besonderen Wert haben die Erscheinungen noch aus dem Grunde für die Meteorologie, weil man aus dem Beugungswinkel ϑ nach obiger Formel die Größe der Wolkenelemente (Radius r der Wassertröpfchen) bestimmen kann.

Eine den Kränzen sehr ähnliche Erscheinung ist die *Glorie*. Fällt der Schatten des Beobachters, der sich z. B. auf einem Berge befindet, auf eine Wolkenwand oder Nebelschichte, so gewahrt er um den Schatten herum eine Aureole und farbige Ringe von den gleichen Eigenschaften, wie bei den Kränzen. Die Glorie wird auch *Ulloas Ring* genannt, nach ihrem ersten Beobachter. In Deutschland heißt sie auch *Brockengespenst*, doch wird dieser Name auch auf die Erscheinung des Schattens allein angewandt. Wir haben es dabei mit der gleichen Erscheinung wie früher zu tun, nur werden die Strahlen der Sonne hier an den Wolkenelementen reflektiert und gebeugt, so daß der Mittelpunkt der Ringe nicht die Sonne, sondern deren Gegenpunkt am Himmel ist.

3c) *Regenbogen*. Der Regen-

bogen ist bekanntlich ein farbiger Kreisbogen, der sich über eine Gegend wölbt, wenn man eine Regenwand vor sich und die Sonne im Rücken hat. Der Mittelpunkt des Bogens ist der Gegenpunkt der Sonne. Häufig erscheinen 2 Bogen übereinander. Der innere, intensivere, ist der Hauptregenbogen. Sein Sonnenabstand ist etwa 42°, er ist außen rot und innen violett gefärbt. Der äußere heißt Nebenregenbogen, sein Sonnenabstand beträgt etwa 50°; bei ihm erscheinen die Farben umgekehrt, außen violett, innen rot. Die sogenannten Regenbogenfarben sind lange bekannt; doch vermutet nur der oberflächliche Betrachter bei jedem Regenbogen alle Farben des Spektrums vorhanden; wer genauer hinsieht, bemerkt, daß jeder Bogen andere Farbenverteilungen zeigt. Die eine Farbe ist z. B. breiter als die andere, eine Farbe fehlt ganz, so oftmals das Blau, insbesondere Dunkelblau. Die Descartessche Theorie des Regenbogens aus dem Jahre 1637, die bis vor kurzem allein anerkannt war, ist nicht imstande, diese Ungleichheiten der Erscheinung zu erklären. Sie ist tatsächlich falsch, die richtige Erklärung wurde von Airy 1836 gegeben, aber erst in jüngster Zeit allgemein bekannt.

Innerhalb des Hauptregenbogens erscheinen sehr häufig noch mehrere schwächere konzentrische Bögen, die sekundären oder „überzähligen" Regenbogen. Auch außerhalb des Nebenregenbogens wurden sie schon beobachtet. Es sind von solchen sekundären Bögen schon 6 zu gleicher Zeit gesehen worden; sie sind gefärbt, am häufigsten sieht man aber nur grün und rosa.

Schließlich beobachtet man gegen Nebelwände mitunter einen weißen, farblosen Regenbogen, besser Nebelbogen. Nur der äußere Rand des Bogens ist bräunlich (orange), der innere schwach violett gesäumt, dazwischen liegt ein breites weißes Band.

Der Regenbogen erklärt sich durch Reflexion und Brechung der Lichtstrahlen in Wassertropfen; soweit hatte Descartes recht. Wir betrachten in Figur 16 zunächst den Gang der Strahlen bei ein- und zweifacher Reflexion in Tropfen. Der Sonnenstrahl S wird beim Eintritt gebrochen, an der Rückwand einmal (Fig. 16 a), oder zweimal (Fig. 16 b) reflektiert und beim Austritt wieder gebrochen nach S'. Die ganze Ablenkung D, die der Strahl durch den Tropfen erfahren hat, ist bei zweimaliger Reflexion gegeben durch $D = 2(i - r) + 2(\pi - 2r)$. Hier ist i der Einfallswinkel, r der Brechungswinkel $(\frac{\sin i}{\sin r} = n)$. Der Strahlengang ist hier für symmetrischen Verlauf im Tropfen gezeichnet. Bei einmaliger Reflexion (Fig. 16 a) ist offenbar $D = 2(i - r) + (\pi - 2r)$. Man kann nun berechnen, für welchen Einfallswinkel i der Strahl die kleinste Drehung D erfährt. Dies ist bei einmaliger Reflexion für $i = 60^0$ (nahezu), bei zweimaliger Reflexion für $i = 72^0$ der Fall, wenn $n = \frac{4}{3}$ für Wasser. Daraus findet man den spitzen Winkel 180°—D, den die Sonnenstrahlen mit dem austretenden Lichtstrahl einschließen, im ersten Fall zu 42° 4', im zweiten zu 50° 23'. Das heißt: der Hauptregenbogen

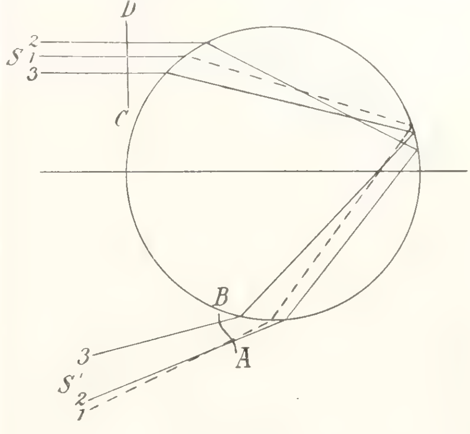


Fig. 17.

entsteht durch einmalige, der Nebenregenbogen durch zweimalige Reflexion im Innern der Tropfen.

Um aber nun die Intensität des Lichtes und die Farben zu erklären, ist eine andere Betrachtung nötig, die recht kompliziert ist und hier nur angedeutet werden kann.

Tatsächlich fallen die Sonnenstrahlen auf den ganzen Tropfen; wegen dessen Kugelgestalt ist der Einfallswinkel für jeden Strahl ein anderer; es kommt nicht nur der mindest gedrehte, in Figur 16 gezeichnete Strahl zur Wirkung, sondern auch alle anderen. Dies hatte Descartes übersehen. Figur 17 gibt ein Bild für diese Strahlenablenkungen in der Nachbarschaft des mindestgedrehten Strahles, der punktiert gezeichnet ist. Die Strahlen treten parallel bei S ein. Jene Strahlen (2) die höher liegen als der mindestgedrehte Strahl (1), werden (es ist nur ein Strahl gezeichnet) nach Austritt aus dem Tropfen konvergieren, wie man daran sieht, daß bei A der Strahl 2 sich dem Strahl 1 nähert und ihn später schneidet. Die niedriger als 1 gelegenen Strahlen (3) hingegen divergieren nach dem Austritt; tatsächlich entfernt sich 3 bei A von 1. Die Folge dieser ungleichen Brechungen und Reflexionen, die hier nur schematisch angedeutet sind, ist eine eigentümliche Wellenfläche AB. Nach einer be-

stimmten Zeit wird sich nämlich die Schwingung, die in S vor Eintritt in den Tropfen in allen Strahlen parallel war (die Wellenfläche CD war eine Ebene), verwandelt haben, so daß die Schwingung nun überall auf der eigentümlich geformten Fläche AB senkrecht steht. Wo diese Fläche nach vorne (gegen S') konvex ist, da divergieren die Strahlen, wo sie konkav ist, konvergieren sie. Der Effekt einer solchen Wellenfläche ist nicht direkt zu übersehen. Er muß nach den Prinzipien der Wellentheorie des Lichtes berechnet werden.

Der Wendepunkt jener Wellenfläche AB, die Airy als das Charakteristische der Regenbogenerscheinung nachgewiesen hat, ist deren Durchschnittspunkt mit dem mindestgedrehten Strahl 1. Airy findet als Gleichung der Fläche bezogen auf ein Koordinatensystem, dessen Mittelpunkt in jenem Wendepunkt liegt, $\eta = \frac{h}{3a^2} \xi^3$. h ist eine Konstante, a ist der Radius der Tropfen. Hier ergibt sich also, daß die Erscheinung des Regenbogens von der Tropfengröße abhängt, was Descartes nicht wußte. Jeder Regenbogen erscheint tatsächlich anders, die Farben und Helligkeiten sind verschieden; hierfür ist die Tropfengröße maßgebend. Werden nun die Strahlen berechnet, die von der Wellenfläche AB ausgehen, so ergibt sich eine sehr eigentümliche Helligkeitsverteilung (mit Hilfe des Airyschen Regenbogenintegrales) zunächst für eine einzelne Farbe (Wellenlänge) in S'. Man erhält für eine solche eine Reihe von Maxima und Minima der Intensität; sind überall die gleichen Tropfengrößen vorhanden, so ist der Effekt ein kreisförmiges Band am Himmel, bestehend aus unzählig vielen einzelnen Kreisbögen, die an Intensität immer schwächer werden, je kleiner ihr Radius wird. Es ergeben sich also an jener Wellenfläche ähnliche Beugungsringe, wie wir sie bei den Kränzen fanden, wenn auch die Helligkeitsverteilung (Distanz und Helligkeit der Extremwerte) hier ganz anders ist. Daraus erklären sich die überzähligen oder sekundären Bögen, die unter dem Hauptregenbogen liegen.

Diese Helligkeitsverteilung wird durch die Kurve der Figur 18 (nach Pernter a. a. O., wo die Rechnung zu finden ist) dargestellt. Die Ordinaten stellen die Intensitäten dar, während auf der Abscisse die Entfernungen von dem Orte des mindestgedrehten Strahles aufgetragen sind. Dieser liegt bei A. Descartes hatte gemeint, er zeichne sich durch besondere Intensität aus. Dies ist nicht der Fall; das Hauptmaximum B, der Hauptregenbogen, liegt in etwas kleinerer Entfernung vom Gegenpunkte der Sonne, in noch kleinerer der erste sekundäre Bogen C usw. An den Orten der zwischenliegenden Minima ist die Intensität des Lichtes Null.

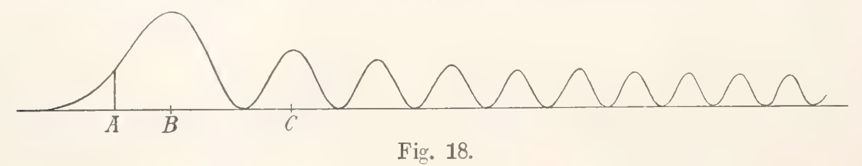


Fig. 18.

Der Nebenregenbogen kommt auf ganz analoge Weise zustande, nur mit 2 Reflexionen im Tropfen (Fig. 16 b). Durch die doppelte Reflexion wird die Lichtstärke herabgesetzt, weswegen die sekundären Bogen des Nebenregenbogens viel schwächer sind. Sie liegen außerhalb desselben.

Diese Betrachtung gilt zunächst nur für Licht von einer Farbe.

Das weiße Sonnenlicht enthält nun alle Spektralfarben; jede hat einen anderen Brechungsexponenten; der Ort A des mindestgedrehten Strahles (Anfangspunkt des Koordinatensystems) liegt also für jede Farbe an einer anderen Stelle. Außerdem sind die Distanzen der Maxima voneinander in Fig. 18 auch von der Wellenlänge abhängig, sie wachsen mit zunehmender Wellenlänge. Es müssen also die Kurven der Figur 18 für jede Wellenlänge einzeln berechnet und nach ihren verschiedenen Anfangspunkten dann übereinandergelegt werden. Auch die ursprüngliche Intensität jeder Farbe muß nach ihrem Werte im Spektrum eingesetzt werden. Pernter hat diese mühsame Arbeit ausgeführt und zwar für verschiedene Tropfengrößen, da auch für jede solche Größe die Uebereinanderlagerung der Kurven (Fig. 18) anders ist. Er benutzte hierzu 8 aus dem Spektrum ausgewählte Wellenlängen, tiefrot, rot, orangegelb, lichtgrün, blaugrün, lichtblau, dunkelblau, violett mit ihren Brechungsexponenten und relativen Intensitäten im Sonnenlichte. Figur 19 gibt diese Kurven bei einer Tropfengröße von 0,5 mm Radius.

Pernter hat nun diese Intensitäten verschiedener Farben für eine Reihe von Tropfengrößen nach dem Maxwellschen Farbendreieck zu Mischfarben zusammengesetzt und auf diese Weise endlich die wahren Farben einiger Regenbogen erhalten. Diese Mischfarben sind mit ihren relativen Breiten, die sie im Farbenband der Regen-

bogen einnehmen in Figur 20 dargestellt, und zwar für 4 Tropfengrößen, nämlich 0,5 mm, 0,15, 0,05 und 0,025 mm Radius. Die letzte Farbenreihe für 0,025 mm Radius zeigt das Bild des „weißen Regenbogens"; tatsächlich treten die übrigen Farben gegen das breite weiße Band ganz zurück. Für noch kleinere Tropfen bleibt Weiß weiter vorherrschend. Der weiße „Nebelbogen" erklärt sich also als gewöhnlicher Regenbogen, erzeugt durch die sehr kleinen Nebeltröpfchen.

4. Erscheinungen, die durch sehr kleine Partikel in der Atmosphäre erzeugt werden. Die Atmosphäre wirkt wie ein *trübes Medium*; sie erzeugt die Farbe, die Polarisation und die Helligkeitsverteilung, wie sie in trüben Medien beobachtet werden. Als trübende Partikel wirken hier einerseits ganz kleine Teilchen fester Substanz, Rauch und Staub, andererseits die Luftmoleküle selbst. Für Teilchen, die gegen die Wellenlängen klein sind, gelten die gewöhnlichen Gesetze der Reflexion, Brechung und Beugung nicht mehr. Zur Versinnlichung der Wirkung, die solch kleine Teilchen auf die einfallenden Sonnenstrahlen ausüben, dient folgende Vorstellung. Die Lichtwellen treffen auf ein kleines Teilchen als transversale Schwingungen auf. Die Lichtschwingungen nun, die der Lichtäther ausführt, übertragen sich, was Schwingungsrichtung und Periode anlangt, auf das Teilchen und versetzen also dieses selbst in Schwingungen.. Hierdurch wird das Teilchen der Ausgangspunkt neuer Aetherschwingungen, indem es seine eigene Schwingung auf den umgebenden Aether überträgt; es wirkt wie eine neue Lichtquelle, freilich nur so lange, als es selbst von Strahlen getroffen und in Schwingung versetzt wird. Das Teilchen zerstreut auf diese Weise Licht nach allen Seiten des Raumes, freilich, wie wir sehen werden, nicht in alle Richtungen Licht derselben Eigenschaften. Diese zerstreuende Wirkung sehr kleiner Partikel nennt man Diffusion des Lichtes; sie ist charakteristisch für die trüben Medien. *Rayleigh* hat die Theorie dieser Diffusion entwickelt (vgl. den Artikel „*Farben*").

4a) *Blaue Himmelsfarbe.* Seine Theorie erklärt zunächst die *blaue Farbe des Himmels*. Diese Farbe ist nicht stets die gleiche, sie ist mitunter weißlichblau, namentlich in der Nähe von Städten, wo Dunst und Rauch die Luft verunreinigen, sie ist tiefblau, dunkel auf Bergen und wird, je höher man sich in der Atmosphäre erhebt, um so schwärzer. Man hat sie früher mit Cyanometern verschiedener Konstruktion gemessen; heute bestimmt man sie mit dem Spektrophotometer, da sie eine Mischfarbe, aus verschiedenen Wellenlängen zusammen-

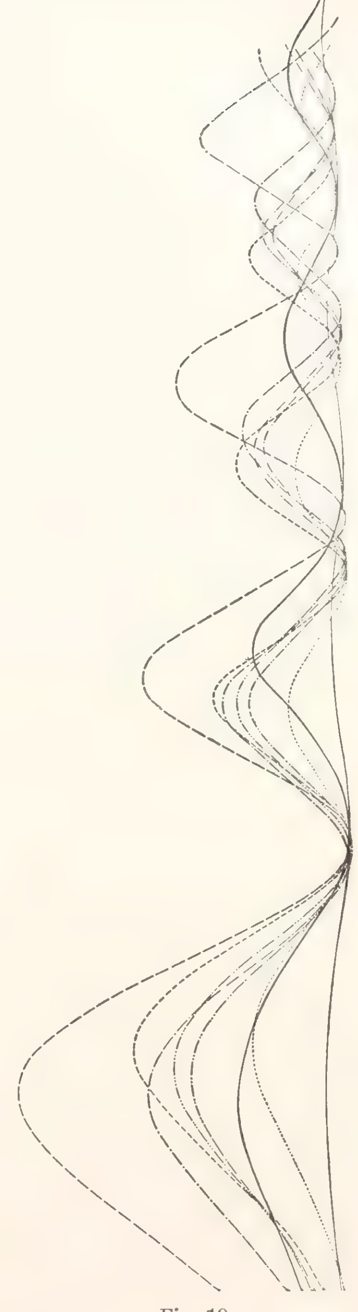


Fig. 19.

tiefrot
rot
orange
lichtgrün
dunkelgrün
lichtblau
dunkelblau
violett

gesetzt, ist. Man hat das Blau irrtümlich auch für eine Eigenfarbe der Luft gehalten.

Wird nach Rayleighs Theorie ein trübendes Partikel der Ausgangspunkt neuer Schwingungen, so muß offenbar die Amplitude dieser sekundären Schwingung, mechanisch gesprochen die Größe des Ausschlages, in einem gewissen Verhältnis zur Amplitude der auf das Teilchen einfallenden primären Lichtschwingung stehen. Diese Verhältniszahl ist dimensionslos, eine unbenannte Zahl. Nun nimmt offenbar die Amplitude der sekundären Schwingung mit der Entfernung vom Teilchen ab, und zwar ist sie, wie bei jeder Lichtschwingung verkehrt proportional dieser Entfernung r. Außerdem ist sie offenbar um so größer, je größer das Teilchen ist, d. h. sie ist dessen Volumen v proportional. Sonst kann diese Verhältniszahl A nur noch abhängen von der Wellenlänge des Lichtes λ. Ist nun A proportional $\frac{v}{r}$ und hängt nur von $\frac{v}{r}$ und von λ ab, so muß, da A dimensionslos ist und v die Dimension der dritten Potenz der Länge, r die der ersten Potenz hat, A proportional sein $\frac{v}{r\lambda^2}$; dann ist A eine reine Zahl. Das heißt aber: die Amplitude ist verkehrt proportional dem Quadrat der Wellenlänge: somit ist die Intensität I des sekundären Lichtstrahles verkehrt proportional der vierten Potenz der Wellenlänge. Aus dieser Tatsache erklärt sich die blaue Farbe des Himmels. Rayleigh fand auf Grund einer genauen Rechnung $I = \frac{K}{r^2\lambda^4}(1 + \cos^2\varphi)$. Hier ist K eine Konstante. Die Intensität des sekundären zerstreuten Lichtes ist also um so größer, je kleiner die Wellenlänge λ ist. Außerdem hängt sie vom Winkel φ ab, der gebildet wird von der Einfallsrichtung des primären Sonnenstrahles mit der Richtung des Sekundärstrahles. Da das Sonnenlicht weiß ist, also in ihm alle verschiedenen Wellenlängen λ vorkommen, so wird die Intensität jeder Farbe des Sekundärstrahls im Verhältnis von 1 : A verringert, mithin die längsten Wellen (rot) am meisten, die kürzesten (violett) am wenigsten geschwächt. Folglich setzt sich der Sekundärstrahl aus sehr schwachem Rot, stärkerem Gelb, noch stärkerem Grün usw. zusammen.

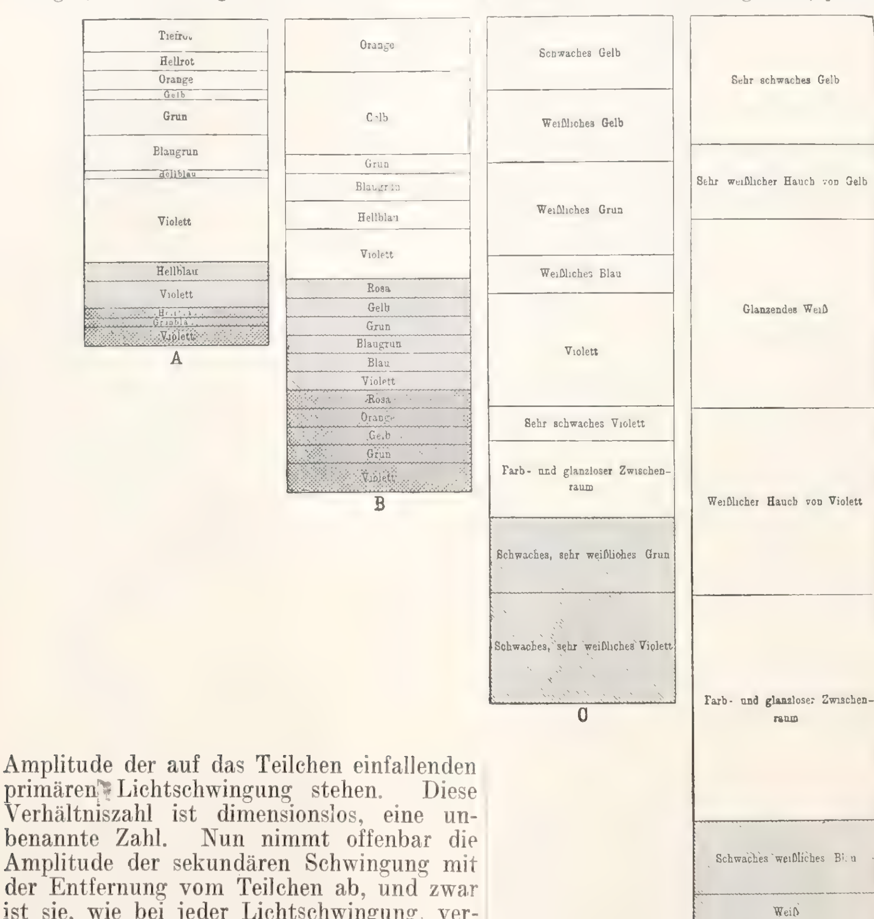


Fig. 20.

Das Resultat ist eine Mischfarbe, und zwar das Blau des Himmels, wie die Analyse dieser Farbe ergeben hat.

Wenn die unzählig vielen kleinen Partikel zusammenwirken, so wird die Farbe dadurch nicht wesentlich verändert. Durch die Zerstreuung der stärker brechbaren Strahlen (blau) an den kleinen Teilchen wird der direkte Sonnenstrahl auf seinem Wege durch die Atmosphäre geschwächt, und zwar verliert er eben an Intensität in den kurzen Wellen. Er färbt sich daher, wenn er anfangs weiß war, immer mehr rötlich. Die Intensität E des durchgehenden Strahles ist, wenn E_0 die des einfallenden war und er eine Strecke x in der Luft zurückgelegt hat, $E = E_0 e^{-\varepsilon x}$, wo e die Basis der natürlichen Logarithmen und ε der Extinktionskoefficient; hier ist $\varepsilon = \frac{c}{\lambda^4}$, wo c eine Konstante.

Tatsächlich beobachtet man in künstlichen trüben Medien, z. B. in einer in Wasser aufgeschwemmten alkoholischen Mastixlösung, eine Rotfärbung des durchgehenden Strahles, während die Lösung von der Seite gesehen blau aussieht. Die gleiche Erscheinung ist die scheinbare Röte aufsteigenden Feuerrauches gegen den Himmel, dessen Bläue gegen einen dunkeln Hintergrund, wie z. B. Wald. Mit der Erklärung der blauen Farbe des Himmels ist auf diese Weise auch die Erklärung der roten untergehenden Sonne gegeben. Legen die Sonnenstrahlen einen sehr großen Weg in der Atmosphäre zurück, wie bei Sonnenuntergang oder Aufgang, so ist x in obiger Formel sehr groß, die Schwächung der blauen Strahlen im Spektrum ungleich größer als die der roten, was die Rotfärbung zur Folge hat.

4b) Polarisation des Himmelslichtes (vgl. den Artikel „Lichtpolarisation"). Das Licht besteht bekanntlich aus Schwingungen, die senkrecht zur Richtung seiner Fortpflanzung vor sich gehen (transversale Wellen). Sonnenlicht ist natürliches Licht, d. h. die Schwingungen geschehen in allen Richtungen, die in einer zum Strahl senkrechten Ebene liegen. Unter polarisiertem Licht versteht man solches, dessen Schwingungen nur in einer einzigen Richtung in jener Ebene geschehen; stellt z. B. das Zifferblatt einer Uhr jene zum Strahl senkrechte Ebene dar, so wird eine Schwingung, die nur von der XII zur VI vor sich geht, oder nur von der VIII zur II, polarisiert genannt. Es gibt nun Kristalle, die Licht nur dann hindurchlassen, wenn es eine in einer bestimmten Richtung polarisierte Komponente besitzt. Diese Eigenschaft benutzt man zum Nachweis der Polarisation, z. B. mittels des Nicolschen Prismas.

Auch die Polarisation des Himmelslichtes erklärt sich aus der Diffusion des Lichtes an kleinsten Teilchen in der Atmosphäre. Diese von Arago entdeckte Erscheinung besteht wesentlich in folgendem: Betrachtet man durch ein Nicolsches Prisma den blauen Himmel, so ist in gewissen Blickrichtungen das Gesichtsfeld beim Drehen des Nicols um seine Achse von schwankender Helligkeit; einmal am hellsten; dann, wenn der Nicol um 90° gedreht ist, fast ganz dunkel. Am stärksten sind diese Schwankungen, wenn man Orte am Himmel betrachtet, die in etwa 90° Abstand von der Sonne liegen. Das Licht ist auf einem größten Kreise in 90° Sonnenabstand am stärksten polarisiert. Doch ist die Polarisation auch dort keine totale, stets ist natürliches Licht dem polarisierten Licht beigemengt, wie man daraus erkennt, daß der Nicol bei jeder Stellung noch Strahlen durchläßt.

Auch die Lage der Polarisationsebene des Lichtes ist durch Beobachtungen festgestellt worden. Normalerweise ist sie an einer beliebigen Stelle des Himmels durch den anvisierten Punkt am Himmel, den Beobachtungsort und die Sonne fixiert; d. h. sie ist jene Ebene, die durch diese 3 Punkte bestimmt wird. Senkrecht zu dieser Ebene finden die Lichtschwingungen des polarisierten Himmelslichtes statt. In der Nähe des Horizonts erleidet hingegen diese regelmäßige Verteilung eine Veränderung. Man entdeckte nämlich mehrere Stellen am Himmel, die natürliches Licht aussenden. Es sind dies namentlich 3 Orte, die sogenannten neutralen Punkte von Arago, Babinet und Brewster. Wenn die Sonne nahe dem Horizont steht, liegt der Aragosche Punkt etwa $18\frac{1}{2}°$ über dem Gegenpunkte der Sonne, also auf der anderen Seite des Horizonts; der Babinetsche etwa ungefähr ebenso viel oberhalb der Sonne selbst; der Brewstersche etwa um den gleichen Betrag unterhalb der Sonne; dieser ist daher nur bei höheren Sonnenständen zu beobachten, und dann wegen der blendenden Sonne schwer wahrnehmbar. Diese neutralen Punkte verändern ihre Sonnendistanz mit der Bewegung der Sonne am Himmel. Unterhalb des Aragoschen und Babinetschen Punktes, nahe dem Horizont, ist die Polarisation ferner normalerweise nicht die gleiche, wie oberhalb, sondern es liegt die Polarisationsebene dort horizontal, während sie, nach dem oben gesagten, in einiger Höhe darüber vertikal liegt Die folgende Figur veranschaulicht die Lage der Polarisationsebene, wenn die Sonne nahe dem Horizont steht, in der Richtung gegen diese.

HH bedeute den Horizont; die Sonne,

S steht etwas über ihm. Die Linie NZ verläuft von der Sonne gegen den Zenith, sie stellt den Sonnenvertikal dar. Die Orte, die auf ihm liegen, haben eine vertikale Polarisationsebene, d. h. die Lichtschwingungen der Strahlen, die von ihnen das Auge treffen, liegen horizontal (m). Rechts vom Sonnenvertikal neigen sich die Polarisationsebenen gegen den Horizont, links gleich-

Fig. 21.

Fig. 22.

falls; die Schwingungen des Lichtes stehen stets senkrecht zu ihnen, wie dies die kleinen Striche m, m′,...m″ andeuten. In N liegt der neutrale Punkt von B a b i n e t (für den A r a g o schen ist die Polarisation genau dieselbe, nur ist S dann der Gegenpunkt der Sonne). Unterhalb desselben liegen die Polarisationsebenen horizontal (zwischen N und S). Bei normaler Verteilung, wie sie oberhalb von N am ganzen Himmel herrscht, würden die Polarisationsebenen den Verlauf haben, der durch die gestrichelten Geraden angedeutet ist, die Ebenen würden sich alle in der Sonne und ihrem Gegenpunkte schneiden.

Zur Erklärung der Erscheinung greifen wir auf die sekundären Schwingungen zurück, die ein kleines Teilchen, das vom Sonnenstrahl S getroffen wird, aussendet. Das Sonnenlicht ist, unpolarisiert, natürlich; die Lichtschwingungen stehen senkrecht zur Strahlenrichtung und können durch 2 Komponenten dargestellt werden, von denen die eine in der Papierebene, die andere senkrecht dazu liegt (in Fig. 22 durch einen Strich und einen Punkt in M angedeutet).

Diese Schwingungen erhalten also auch die Teilchen in B, C und D. Das Teilchen in B, dessen Verbindungslinie mit dem Auge A gerade senkrecht steht zum Strahle S_1B, macht also die gleichen Schwingungen wie in M der Lichtstrahl S_1. Das Teilchen in B kann aber in der Richtung BA nur dessen eine Komponente als Lichtstrahl fortpflanzen, nämlich die zu S_1B und AB senkrechte, da das Licht eine transversale Schwingung ist. Das Auge in B erhält demnach nur diese eine Schwingung; d. h. der Strahl BA ist vollständig polarisiert, die Polarisationsebene geht durch Sonne S, an visierten Punkt am Himmel B und Auge A (Papierebene). Der Lichtstrahl S_2 treffe auf das Teilchen C. In der Richtung zum Auge kann dann C wieder die ganze zur Papierebene senkrechte Schwingung weitergeben und außerdem einen Teil der anderen Komponente (als Strich in M gezeichnet), der senkrecht steht zum Strahl CA. Dieser ist also nicht mehr total polarisiert, sondern besteht aus einem Teil natürlichen Lichtes, entsprechend diesem Komponentenanteil, und einem Teil polarisierten Lichtes. Man erhält also unter dem stumpfen Winkel γ gegen die Sonnenstrahlen S′A aus C partiell polarisiertes Licht; das gleiche gilt für die Richtung AD, die einen spitzen Winkel mit AS′ bildet.

So erklärt sich also die maximale Polarisation in 90° Sonnenabstand, die geringere bei größerem oder kleinerem. Hingegen stammt diese Theorie nicht mit der Tatsache, daß auch in 90° Sonnenabstand das Licht nicht total polarisiert ist. Diese Erscheinung geht aus der mehrfachen Diffusion des Lichtes hervor. Ein Lichtstrahl S wird an einem Teilchen zerstreut; die zerstreuten Strahlen treffen nun nicht unmittelbar ins Auge, sondern begegnen auf ihrem Wege noch unzähligen anderen Teilchen. Die Rechnung ergibt, daß diese mehrfache Diffusion die Ursache ist, daß die Polarisation auch in 90° Sonnenabstand nur partiell bleibt; auch erzeugt sie eine horizontale Polarisation in der Nähe des Horizontes, sie ist die Ursache für die in Figur 21 gezeichnete Störung des normalen Verlaufes der Polarisationsebenen daselbst. Wenn nun am

Horizont die Polarisation horizontal ist, darüber (oberhalb) vertikal und nirgends total, so heißt dies offenbar, daß am Horizont die vertikale Lichtschwingung überwiegt, zenithwärts die horizontale. In der Mitte muß es dann einen Ort geben, wo die horizontale Schwingung eben gleich ist der vertikalen; dort ist das Licht unpolarisiert, dort entsteht der neutrale Punkt.

Die Polarisation in der Nähe des Horizonts kann nicht unerheblich durch die Reflexion des Lichtes von der Erdoberfläche gestört werden, z. B. bei einer Schneedecke; auch Wolken können sie beeinflussen.

4c) Lichtschwächung in der Atmosphäre. Es wurde schon oben der Extinktionskoefficient angegeben, wie er aus der Rayleighschen Theorie der trüben Medien hervorgeht. Nach obiger Formel ist die Lichtschwächung der Sonnen- oder anderer Strahlen zu berechnen, die durch die Atmosphäre erzeugt wird. Tatsächlich erfahren alle Strahlen, auch die Wärmestrahlen eine Intensitätsabnahme, die man setzen kann $dE = -\varepsilon E dx$, woraus sich die Formel ergibt $E = E_0 e^{-\varepsilon x}$. E_0 ist die Intensität des Strahles an der Grenze der Atmosphäre. Der Weg x ist aber unbekannt, da wir die Ausdehnung der Atmosphäre nicht kennen. In Fig. 23 ist ein schief in die Atmosphäre einfallender Strahl SA gezeichnet. Sei A der Beobachtungsort, Z der Zenith, so bildet der Sonnenstrahl SA einen Winkel z mit ZA, die Zenithdistanz der Sonne. Der Weg, den der Strahl in der Atmosphäre zurücklegt, ist CA = BA sec z. Stünde die Sonne im Zenith, so wäre die Intensität des Lichtstrahles, der in A ankommt $E_1 = E_0 e^{-\varepsilon x_1}$, wo $x_1 = AB$; steht sie in S, so ist $E = E_0 e^{-\varepsilon x_2}$, wo $x_2 = AC$; folglich ist $E = E_0 e^{-\varepsilon x_1 \sec z}$, oder, wenn $e^{-\varepsilon x_1} = \frac{E_1}{E_0} = p$ gesetzt wird, $E = E_0 \, p^{\sec z}$. Dies ist die angenäherte Gleichung für die Strahlenschwächung in der Atmosphäre. Hier nennt man p den Transmissionskoefficienten. Er ist das Verhältnis der am Beobachtungsorte eintreffenden Lichtintensität zu jener außerhalb der Atmosphäre bei senkrechter Incidenz. Die Formel ist nicht genau, da die Atmosphäre wie die Erde gekrümmt ist und die Strahlenbrechung vernachlässigt wurde.

Der Transmissionskoefficient wurde vielfach gemessen; er beträgt für Lichtstrahlen ungefähr 0,8 im Meeresniveau. In größeren Höhen ist er natürlich größer. Es gelangen also etwa 80 % des im Zenith vertikal einfallenden Lichtes bis zur Erdoberfläche. Die übrigen 20 % sind größtenteils durch Zerstreuung an den kleinsten Teilchen dem direkten Lichtstrahl entzogen worden. Je schiefer der Strahl einfällt, d. h. je niedriger die Sonne, der Mond oder der Stern steht, desto weniger Licht gelangt zur Erde, da $p^{\sec z}$ mit wachsendem z stets kleiner wird; p hängt nun wie ε von der Wellenlänge ab, die blauen Strahlen werden stärker geschwächt als die roten. Doch ist der Unterschied innerhalb des Bereiches der sichtbaren Wellenlängen nicht von großer Bedeutung. Die längeren Wellen hingegen haben allerdings schon einen erheblich größeren Transmissionskoeffizienten.

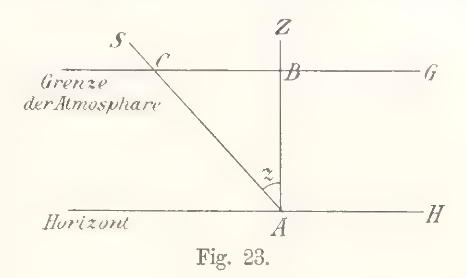


Fig. 23.

4d) Tageslicht. Jene 20 %, die der direkten Strahlung bei senkrechter Incidenz verloren gehen, kommen nun in der Tageshelle wieder teilweise zum Vorschein. Die an den kleinen Teilchen zerstreuten Strahlen werden ja in alle Himmelsrichtungen abgelenkt und verursachen auf diese Weise die Helligkeit des Himmels und das Tageslicht. Man hat das Tageslicht photometrisch (durch Vergleich mit anderen Lichtquellen) und mit lichtempfindlichen Substanzen bestimmt. Es zeigt sich, daß die Tageshelle um so größer ist, je kleiner der Transmissionskoeffizient. Das folgt ganz einfach aus der Ergänzung von diffusen und direkten Strahlen. So ist in größeren Höhen die direkte Strahlung der Sonne größer, dafür der Himmel bedeutend dunkler.

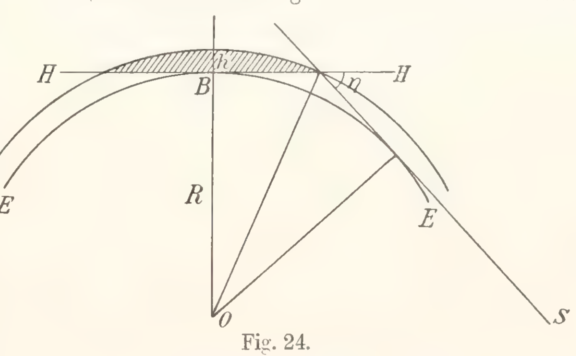


Fig. 24.

Die Intensität des Himmelslichtes ist

bei hohem Sonnenstand etwa 2 bis 3 mal geringer (in niedrigen Seehöhen) als die des direkten Sonnenlichtes. Steht die Sonne aber nahe dem Horizont, so ist sie größer. Gleichheit zwischen beiden tritt etwa bei einer Sonnenhöhe von 30 bis 40° ein; doch ist diese Höhe zeitlich und örtlich natürlich verschieden. Photometrisch gemessen betrug nach Weber die Intensität des gesamten Tageslichtes (Sonnenlicht + Himmelslicht) in Kiel auf einer horizontal exponierten Fläche im Jahresmittel etwa 36 000 Meterkerzen um Mittag. Der Mittelwert für den Juli ist 60 000, der für den dunkelsten Monat Dezember 5500 Meterkerzen. Der höchste je gemessene Wert war 154 300, der niedrigste 655 Meterkerzen, gleichfalls um Mittag. Das Tageslicht unterliegt also auch zur gleichen Tageszeit ganz enormen Schwankungen. Während man die Beleuchtung einer horizontalen Fläche als Oberlicht bezeichnet, nennt man jene von vertikal aufgestellten Flächen Vorderlicht. Das Vorderlicht ist natürlich verschieden je nach der Orientierung zur Sonne.

Die Helligkeit verschiedener Stellen des Himmels ist nicht gleich. Rayleighs oben angegebene Formel gibt eine Abhängigkeit der Intensität des diffusen Lichtes vom Sonnenabstand des anvisierten Punktes. In 90° Abstand ist die Intensität am kleinsten, in der Richtung der Sonnenstrahlen selbst am größten. Wiener hat auch die Beugung des Lichtes an größeren Teilchen (Wassertropfen usw.) noch in Betracht gezogen; sie verstärken namentlich die Lichtintensität in der Umgebung der Sonne. Außerdem ist stets eine Zunahme der Helligkeit des Himmels gegen den Horizont vorhanden, so daß bei tiefstehender Sonne die geringste Helligkeit nahe dem Zenith liegt und sich bei steigender Sonne vom Zenith aus gegen die nördliche Himmelshälfte verlagert. Die hellste Stelle des Himmels (von der Sonne natürlich abgesehen) kann etwa 10 mal so hell sein wie die dunkelste.

4e) Dämmerungserscheinungen. Die Tatsache, daß der Tag nach Sonnenuntergang nicht plötzlich in dunkle Nacht übergeht, sondern von ihr durch eine Zeit der Dämmerung getrennt ist, und die analoge Tatsache am Morgen, haben wesentlich die gleiche Ursache wie die diffuse Tageshelle. Das von den kleinen Teilchen in der Atmosphäre zerstreute Licht kann noch zu einer Zeit ins Auge des Beobachters treffen, wo die Sonne schon untergegangen ist. Die direkten Sonnenstrahlen treffen dann noch höhere Schichten der Atmosphäre und verursachen das diffuse Himmelslicht der Dämmerung.

In Figur 24 ist B der Beobachtungsort auf der Erde EE, HH der Horizont; der äußere Kreis bezeichne die Grenze der bei der Diffusion der Strahlen noch wirksamen Atmosphäre. Sobald die Sonne S einen Depressionswinkel η unter dem Horizont (nach dem Untergang) erreicht hat, tritt über dem Horizont (schraffierter Teil der Atmosphäre) totale Nacht ein. Dieser Winkel bezeichnet das Ende der astronomischen Dämmerung; er beträgt erfahrungsgemäß 16 bis 18°. Da die Dämmerung beginnt, sobald die Sonne im Horizont anlangt, ist η für deren Dauer maßgebend. Die Zeit, die die Sonne braucht, um diesen Winkel zurückzulegen, ist von der Jahreszeit und der geographischen Breite abhängig. Aus η kann h, die Höhe der wirksamen Atmosphäre, berechnet werden; man findet dafür etwa 60 km. Neben der astronomischen spricht man noch von einer bürgerlichen Dämmerung; sie dauert vom Beginn der ersteren bis zu einer Depression der Sonne von 6 bis 8°. Die Differenz der astronomischen und bürgerlichen Dämmerung heißt auch Zwielicht; es ist die Zeit von 6 bis 16° oder von 8 bis 18° Depressionswinkel. Im Laufe der Dämmerung beobachtet man am Himmel, namentlich im Osten und Westen, gewisse Farbenerscheinungen. Für eine Abenddämmerung ist deren Verlauf schematisch folgender (es treten durchaus nicht immer alle Einzelerscheinungen auf): Noch ehe die Sonne untergegangen ist, entsteht am Osthimmel die erste Gegendämmerung. Es erscheinen gelbe und rote Farben über dem Horizont. Sinkt die Sonne im Westen hinab, so taucht im Osten der erste Erdschatten auf, ein aschfarbenes, dunkles Segment, das die farbigen Töne von unten her einengt. Er bewegt sich langsam am Osthimmel zenithwärts, wurde aber meist nur bis in eine Höhe von 6 bis 10° gesehen. Im Westen ist oberhalb der Sonne, noch ehe sie untergegangen, der Dämmerungsschein sichtbar, ein etwa kreisförmiges helleres Gebiet am Himmel das der sinkenden Sonne nachfolgt und sich dabei verbreitert. Gleich nach Sonnenuntergang färben sich die dem Horizont nächsten Schichten im Westen gelblich und rötlich. Die obere Grenze dieser Schichten nennt man den ersten Dämmerungsbogen; auch er folgt langsam der Sonne nach. Unterdessen entwickelt sich oberhalb desselben das erste Purpurlicht, die schönste Erscheinung der Dämmerung, das eigentliche Abendrot, ein etwa kreisförmiges, schlecht begrenztes Gebiet mit Rosafärbung, das bei seinem Sinken gegen den Horizont sich verbreitert und schließlich hinter dem Dämmerungsbogen unterzutauchen scheint. Sein Verschwinden bringt eine auffallende Abnahme der Tageshelle mit sich, die bürgerliche Dämmerung

ist damit zu Ende. Häufig sieht man im Purpurlicht sternförmig vom Horizont ausgehende dunkle Bänder, die Dämmerungsstrahlen. Sie sind Schatten von Wolken oder Gegenständen auf der Erde und konvergieren mitunter scheinbar wieder im Ostpunkt. Unterdessen ist der Erdschatten über den Zenith auf den Westhimmel gerückt und wird dort wieder als Grenze des hellen beleuchteten Westhorizonts sichtbar; man nennt diesen Bogen den zweiten Dämmerungsbogen; damit beginnt die zweite Dämmerung. Nach Absinken des ersten Purpurlichtes erscheint nun unter günstigen Umständen ein zweiter Erdschatten über dem Osthorizont, über dem sich neuerlich hellere Töne gebildet hatten. Der erste Dämmerungsbogen verschwindet unter dem Horizont, der zweite sinkt immer tiefer und es zeigt sich über dem letzteren ein zweites Purpurlicht, diffuser als das erste. Auch dieses sinkt hinter dem hellen Streifen im Westhorizont hinab und schließlich verschwindet auch dieser zweite Dämmerungsbogen, womit endgültig die Nacht eintritt.

Die Entstehung des Erdschattens erklärt sich schon aus dessen Namen. Die am Horizont liegenden gelben und roten Schichten werden wohl größtenteils durch die Extinktion der blauen Strahlen verursacht. Es wurde ja oben gezeigt, daß diese rascher dem direkten Licht entzogen werden, als die roten. Die Purpurlichter hingegen scheinen wesentlich auf einer Beugung des Lichtes, das ohnedem schon rot ist, zu beruhen. Tatsächlich war nach starken Vulkanausbrüchen um die Sonne auch bei Tag ein Beugungsring, der Bishopsche Ring zu sehen, der durch den feinen Staub in ähnlicher Weise erzeugt wurde, wie die Aureole der kleinen Höfe durch Eiskristalle und Wassertropfen. Bei sinkender Sonne bildete sich aus dem Bishopschen Ring das Purpurlicht in abnorm starker Entwickelung. Man hat daher Ursache, es als eine Beugungserscheinung anzusprechen, erzeugt durch die zahlreichen größeren Wasser- und Staubteilchen, die nahe der Erdoberfläche in der Atmosphäre schweben. Das zweite Purpurlicht scheint dem ersten seine Entstehung zu verdanken, indem für dieses das erste als Lichtquelle in gleicher Weise wirkt, wie für das erste die Sonne selbst. Auch die anderen Erscheinungen der zweiten Dämmerung sind wohl vom ersten Purpurlicht in analoger Weise verursacht, wie die der ersten von der Sonne.

Bei der Morgendämmerung treten die Phasen der Dämmerung natürlich in umgekehrter Reihenfolge auf.

In den Tropen sind die normalen Erscheinungen der Dämmerung oft wesentlich stärker als bei uns, derart, daß uns Beschreibungen davon wie Märchen erscheinen. Namentlich zur Regenzeit oder zur Zeit der Steppenbrände sind diese Erscheinungen ganz wunderbar.

Die sinkende Sonne bestrahlt natürlich die Bergspitzen zuletzt. Die rote Färbung der Strahlen bedingt das bekannte Glühen der Berge. Das eigentliche Alpenglühen, auch Nachglühen, tritt aber erst nach Sonnenuntergang ein, wenn das erste Purpurlicht die schon erblaßten Gebirge neuerlich rötet. Mitunter ist auch noch ein zweites Nachglühen sichtbar, durch das zweite Purpurlicht in gleicher Weise verursacht. Eine Helligkeitszunahme nach Sonnenuntergang durch das erste Purpurlicht beobachtet man auch in der nächsten Umgebung, namentlich nehmen gegen Westen gekehrte Hausmauern u. dgl. dann aufs neue eine leuchtend rote Färbung an.

Literatur. *Zusammenfassende Arbeiten:* ***Clausius*** *in Grunerts Beiträgen zur meteorologischen Optik 1850.* — ***Mascart,*** *Traité d'optique, Bd. III, Paris 1893.* — ***Pernter-Exner,*** *Meteorologische Optik 1910. Hier ist die vollständigste Behandlung und Literatur zu finden.* — *Einige grundlegende Arbeiten:* ***Laplace,*** *Mécanique céléste, Bd. 4, 1805.* — ***Biot*** *Mém. d. L'Institut, Paris 1810.* — ***Bravais*** *Ann. d. Ch. e. Phys. 1856.* — ***K. Exner,*** *Ueber die Scintillation Wien 1891.* — ***Arago,*** *Werke.* — ***Bravais*** *Compt. rend. 1845, 1846, 1847, 1849, 1851.* — ***Airy*** *Trans. Cambridge Phil. Soc. 1838, 1848.* — ***Rayleigh*** *(Strutt) Phil. Mag. 1871, 1881, 1899.* — ***Brücke*** *Pogg. Ann. 1853.* — ***Soret*** *Arch. d. Sc. phys. et nat. 1888.* — ***Lambert,*** *Photometrie 1760.* — ***Chr. Wiener,*** *Nova Acta Leop. Car. Ak., Halle 1900.* — *Ueber normale Strahlenbrechung, Dämmerung und Lichtschwächung vgl. die Lehrbücher der Astronomie und Geodäsie.*

F. M. Exner.

Atmung.

Physiologie der Atmung und der Blutgase.

I. Allgemeines: 1. Zweck und Aufgabe der Atmung. 2. Aero- und Anaerobiose. 3. Aeußere und innere Atmung. 4. Die Atmungsorgane. II. Die Mechanik der Lungenatmung: 1. Methodik der Untersuchung der Atemmechanik. 2. Die Druckverhältnisse bei der Atmung 3. Die Atembewegungen (Atemmuskeln, Atmungstypen, die zeitliche Folge der In- und Exspirationserscheinungen, die Atemfrequenz). 4. Die durch die Atembewegungen bedingten Volumsänderungen. 5. Kraft und Arbeit der Atemmuskulatur. 6. Die zuführenden Atemwege. 7. Perkussion und Auskultation. III. Die Innervation der Atembewegungen: 1. Zentrifugale und zentripetale Bahnen. 2. Reflexe. 3. Das Atmungszentrum. IV. Chemie der Atmung: 1. Die Blutgase. a) Methodik. b) Chemische und physikalische Bindung. c) Gehalt des Blutes an den einzelnen Gasen. d) Austausch

der Gase zwischen Blutkörperchen und Plasma. e) Einflüsse auf den Gasgehalt des Gesamtblutes. f) Die Gasspannungen im Blute. g) Gasbindende Stoffe im Blute niederer Tiere. 2. Die alveolare Tension. Der Gasaustausch zwischen Blut und Lungenluft. Sekretionstheorie. 3. Die chemischen Veränderungen der geatmeten Luft. Atmen abnormaler Gasgemenge. V. Haut und Darmatmung. VI. Die Gewebsatmung. VII. Die Größe des Gesamtgaswechsels. Erhaltungsumsatz und Arbeitsumsatz. Berechnung des Umsatzes aus der Atmung. VIII. Der embryonale Gaswechsel. IX. Der Gaswechsel der Winterschläfer. X. Der Gaswechsel bei Kaltblütern.

I. Allgemeines.

1. Zweck der Atmung. Das Leben ist die Summe der Erscheinungen von Assimilation und Dissimilation. Diese Vorgänge sind gekennzeichnet durch die Umlagerung chemischer Moleküle im Lebewesen und durch einen steten Wechsel zwischen latenter und kinetischer Energie. Die Nahrungsstoffe müssen assimiliert werden, die Produkte der Dissimilation, des Stoffabbaues, die zum großen Teil für die Zelle, welche diese produziert hat, giftig sind, müssen ausgeschieden oder in unschädlicher Form abgelagert werden. Insoweit dieser Wechsel zwischen Aufnahme und Abgabe, zwischen Aufbau und Abbruch, chemische, nicht gasförmige Verbindungen betrifft, spricht man vom Stoffwechsel in engerem Sinne. Den Austausch gasförmiger Verbindungen bezeichnet man als Gaswechsel; dieser stellt also nur einen Teil des gesamten Stoffumsatzes oder Stoffwechsels vor. Durch den G a s w e c h s e l oder die A t m u n g wird den Tieren der Sauerstoff, den sie für ihre Lebensprozesse als „Nahrungsmittel" benötigen, zugeführt und werden Kohlensäure, Wasserdampf, Methan, eventuell auch Ammoniak entfernt, Kohlensäure und Ammoniak sind giftige Dissimilationsprodukte. In gegensätzlichem Verhalten bedarf die Pflanze der Kohlensäure zur Assimilation, während der Sauerstoff bei ihr ein Dissimilationsprodukt vorstellt. Allerdings verlaufen bei der Pflanze auch Stoffwechselvorgänge, die wie beim Tier mit Sauerstoffverbrauch und Kohlensäureproduktion einhergehen (vgl. den Artikel „Atmung der Pflanzen").

2. Aero- und Anaerobiose. Eine Atmung ist nicht nur bei jenen Tieren nötig, die gasförmigen oder gelösten Sauerstoff für die Unterhaltung ihrer Oxydationsprozesse benötigen, sondern es müssen auch solche tierische Zellen die gebildete Kohlensäure abgeben, die ohne Zufuhr elementaren Sauerstoffes unter Verwendung jener Sauerstoffmoleküle oxydieren, die sie aus sauerstoffreichen Verbindungen, z. B. Kohlehydraten, abspalten oder die CO_2 durch die Wirkung von Fermenten erzeugen. Es ist übrigens wahrscheinlich, daß hierbei der letztgenannte Vorgang der einzig in Betracht kommende ist. Man hat früher angenommen, daß organisches Leben ohne Oxydation undenkbar sei. Diese Auffassung kann heute jedoch nicht mehr aufrecht erhalten werden, seitdem nachgewiesen ist, daß streng anoxybiotisch lebendes Protoplasma, für das Sauerstoff ein intensives Gift vorstellt, Energie aus nicht oxydativem Zerfall produziert. Allerdings geschieht dabei die Umsetzung unökonomischer; des ungeachtet müssen aber die entstehenden Dissimilationsprodukte ausgeschieden werden, da mit der ausgiebigeren Produktion solcher Stoffe deren Wegschaffung gleichen Schritt halten muß. Niedere Lebewesen mit großer Oberfläche und geringem Energiebedarf können dieser Bedingung dauernd gerecht werden; bei ihnen findet Ausatmung ohne Einatmung statt oder es überwiegt der Ausatmungsprozeß über jenen der Einatmung (s. S. 708). Bei höheren Lebewesen ist ein anaerobiotisches Leben jedoch nur begrenzt möglich. Die Anhäufung nicht bis zu den Endprodukten oxydierter und nicht weggeschafter Dissimilationsprodukte wirkt erst reizend, dann lähmend und endlich tötend. Rechtzeitige Wiederherstellung der Atmungsvorgänge vermag die Lähmung wie die Reizzustände wieder rückgängig zu machen. Die Tatsache, daß auch höher organisierte Tiere — P f l ü g e r hielt Frösche 25 Stunden in sauerstoffreier Atmosphäre — unter Sauerstoffabschluß am Leben bleiben oder daß Froschmuskeln ohne Sauerstoff geraume Zeit Energie zu produzieren vermögen (H e r m a n n), weist darauf hin, daß das Protoplasma höherer Tiere sich bis zu einem gewissen Grade ebenso verhält wie jenes niederer. Es vermag bei mangelnder Sauerstoffzufuhr durch die Verwertung des aus sauerstoffreichen Verbindungen abgespaltenen Sauerstoffes die erforderlichen Verbrennungsvorgänge zu unterhalten oder wahrscheinlicher durch nicht oxydativen Abbau Energie zu produzieren. Da die hierbei entstehenden, für das Protoplasma der höheren Tiere schädlichen Zwischenprodukte nach Wiederherstellung hinreichender Sauerstoffzufuhr von außen erst allmählich oxydiert und weggeschafft werden, erholt sich das Protoplasma der höheren Tiere unter einer Verschiebung im Chemismus des normalen Gaswechsels nur langsam. Es ist nicht nötig, zur Erklärung eines solchen vorübergehenden anaerobiotischen Lebens, das Vorhandensein von Sauerstoffdepots im Körper anzunehmen; durch das Experiment wurde in der Tat bewiesen, daß solche nicht bestehen (W i n t e r s t e i n). Auch die Forderung, daß die energiespendenden Prozesse Oxydationsprozesse sein **müssen**, ist nicht unbedingt aufrecht zu erhalten. Es kann auch

auf Grund fermentativer Spaltungen Energie geliefert werden. Der Vorteil, den das atmende Tier gegenüber dem anaerobiotisch lebenden besitzt, ist darin gelegen, daß jenes unter weitergehendem Zerfall die Nährstoffe zweckmäßiger für die Energieproduktion auszunützen vermag und dadurch auch imstande ist, trotz geringerer Nahrungszufuhr größere Energiemengen zu produzieren.

3. **Aeußere Atmung und innere oder Gewebsatmung.** Die atmenden Gewebe, die in unmittelbarem Kontakt mit einem gashaltigen Medium stehen, vermögen so lange aus dieser Umgebung Gas aufzunehmen oder geben an diese Gas ab, bis der Teildruck jedes der vorhandenen Gase im Medium wie im Gewebe derselbe ist, bis also Spannungsausgleich erreicht ist. Hierbei spielt nicht nur das Lösungsvermögen der Gewebsflüssigkeit eine große Rolle, sondern es kommen auch chemische Affinitäten, die zur Bindung von Gasmolekülen führen, in Betracht. Der Gasaustausch kann an der äußeren, oft durch Ausstülpungen vergrößerten Oberfläche des Körpers oder an Einstülpungen in den Körper vor sich gehen, die mit der Umgebung kommunizierende Hohlräume umgrenzen. Dann spricht man von äußerer Atmung. Oder es findet der Gaswechsel im Innern des Körpers zwischen den Zellen und der sie umspülenden Flüssigkeit statt. Dann wird die Atmung als innere oder Gewebsatmung bezeichnet.

Durch die Ausbildung einer schützenden, die Körperoberfläche überziehenden Decke, die widerstandsfähig gegen chemische und mechanische Einwirkungen ist und zugleich einen Schutz gegen Wasserverlust und zu große Wärmeausgaben vorstellt, ist bei höheren Tieren der Gaswechsel an der äußeren Körperoberfläche auf ein Minimum herabgedrückt. Umso größer die Anforderungen an die Leistungen der Lebewesen wurden, umso günstiger mußten die Bedingungen für den Gaswechsel gestaltet werden. Anstelle der für Gase schwerer durchgängigen äußeren Decke übernahmen die Ausstülpungen oder Einstülpungen unter mächtiger Oberflächenvergrößerung die Aufgabe der äußeren Atmung. Durch diese Verlagerung war es auch möglich, das respirierende Gewebe äußerst zart und gasdurchlässig zu bauen, da es durch die äußeren Hüllen geschützt werden konnte und so weniger der Gefahr einer Schädigung ausgesetzt wurde. So stellen die Kiemendeckel der Fische, die Falten, Röhren und Taschen in welche die Kiemen zurückgezogen werden können, bereits Schutzorgane gegen Austrocknen, z. B. beim Palmdieb, und Verletzung des zarten respirierenden Gewebes, z. B. bei Spirographis, vor. Je höher die relative Leistung des Tieres stieg, umso gewaltiger mußte der Gaswechsel anwachsen, weshalb bei den Vögeln die Vergrößerung der respirierenden Oberfläche in der Lunge auf ein Maximum gesteigert wurde. Bei ihnen wie bei den Säugetieren ist die Hautatmung vollkommen in den Hintergrund gedrängt worden. Lähmt man bei diesen Tieren die Gesamtmuskulatur und damit auch die Atemmuskulatur durch Curare, so tritt Erstickung und der Tod ein, weil der Hautgaswechsel vollkommen unzulänglich ist, den Sauerstoffbedarf zu decken. Ein durch Curare vergifteter Frosch vermag jedoch auf Grund seines Hautgaswechsels allein das Leben weiter zu fristen.

Da auch der Darm eine Einstülpung der Körperoberfläche vorstellt, muß der in ihm sich vollziehende Gaswechsel der äußeren Atmung zugezählt werden. Der durch die Darmschleimhaut stattfindende Gasaustausch ist mit wenigen Ausnahmen ebenfalls verschwindend klein.

4. **Die Atmungsorgane.** Je nach dem Medium, in dem das atmende Tier lebt, mußten die Atmungsorgane eine verschiedene, den Umständen zweckmäßig angepaßte Ausbildung erfahren. Dementsprechend können zwei Haupttypen von Atmungsorganen unterschieden werden: Organe, die der Wasseratmung und solche, die der Luftatmung dienen.

Wasseratmung. Bei hinreichend dünner Körperbedeckung und niedrigem Stoffwechsel benötigen niedrig organisierte Lebewesen überhaupt keinen eigenen Atemapparat. Die Zelle besorgt alles in eigener Person. Sie assimiliert und dissimiliert, sie ist Bewegungs- und Sinnesorgan zugleich und sie nimmt auch den nötigen Sauerstoff, der ihre Zellwand durchdringt, durch diese auf; ebenso tritt Kohlensäure oder Ammoniak, wenn der Teildruck im Zellinnern höher ist als in der umgebenden Flüssigkeit, in diese über. Auch bei manchen Ringelwürmern und den Egeln reicht der Gasaustausch zwischen der äußeren Körperoberfläche und dem Wasser aus, da die Blutgefäße bis knapp unter die oberflächlichsten, dünnen Zellschichten eindringen. Bei jenen niederen Tieren, Mollusken, Krebsen, Fischen und manchen Würmern, die durch die Körperoberfläche hindurch nicht mehr zureichend zu atmen vermögen, ist es zur Ausbildung von Kiemen gekommen. Diese sind so gebaut, daß möglichst für Erneuerung des Atemwassers gesorgt ist. Dies wird entweder dadurch erreicht, daß die Wimperbewegung von Flimmerzellen immer frisches Atemwasser zuführt, oder man findet die Kiemen an den Füßen, die im Wasser bewegt werden, angeordnet (Wasserasseln; manche Krebse). Bei anderen Kiemenatmern stellen die Kiemen feine büschelförmige, vielfach verzweigte Ausstülpungen vor, an denen

das Wasser vorbeistreicht. In ungeheurer Mannigfaltigkeit variieren die Formen von Blättchen, Rippen und Leisten, die reich von Blut durchflossen, bei den verschiedenen Arten in verschiedener Weise von Wasser bespült werden. Sinnreiche Einrichtungen schützen bei Fischen, die das Wasser verlassen, die Kiemen vor dem Eintrocknen.

Nach ihrer Anlage sind die Kiemen der Fische zum Teil als Abkömmlinge des äußeren Hautüberzuges, zum Teil als solche des Vorderdarms zu betrachten.

Die Atmung durch die Kiemen erfolgt bei den Fischen dadurch, daß das Atmungswasser von der Maulhöhle her an den Kiemen vorbeigepreßt wird. Manche Fische schnappen an der Wasseroberfläche Luft und pressen diese mit dem Wasser vermischt an den Kiemen vorbei. Diese selbst sind durch die Kiemenarterien reichlich mit Blut versorgt, das durch die Kiemenvenen wieder abgeführt wird. Gegen Verletzungen durch Nahrungspartikel, die vom Vorderdarm aus in den Kiemenapparat eindringen könnten, ist dieser durch eine Art „Rechen" geschützt.

Wie innig die Entwickelung der Kiemen mit der Forderung nach der Deckung des Sauerstoffbedarfes verknüpft ist, ergibt sich aus der Tatsache, daß die Kiemen der Larven von Rana fusca eine mächtige, die normale Größe weit übersteigende Entwickelung erfahren, wenn die Tiere in sauerstoffarmem Wasser gehalten werden, wogegen in sehr sauerstoffreichem Wasser nur ganz rudimentäre Kiemen zur Ausbildung gelangen (Babák).

Die Kiemenhöhlenatmung, die sich bei manchen Krebsen findet, stellt wohl den primitiven Uebergang zur Luftatmung vor. Die Luft wird in die vergrößerte, reich vascularisierte Kiemenhöhle gepreßt, in der der Gasaustausch stattfindet. Diese Form der Atmung ermöglicht es den Tieren auch am Lande zu leben.

Die Luftatmung. Ist schon die Kiemenhöhlenatmung eigentlich der Luftatmung zuzuzählen, so ist die Labyrinthatmung des Kletterfisches (Anabas scandens) und seiner Verwandten wohl unzweifelhaft als echte Luftatmung aufzufassen. Das Tier schnappt Luft und treibt diese in die sogenannte Labyrinthhöhle, deren Kämme von reichlichen Blutgefäßmaschen durchzogen sind. Es kommt dabei zu so innigem Kontakt der Luft mit dem Blut, daß der Fisch auch am Lande seinen Sauerstoffbedarf durch einige Zeit vollkommen zu decken vermag.

Bei den Schlammpeitzgern findet der Gasaustausch im Mitteldarm statt, der mit zylindrischem Epithel ausgekleidet ist, dieses wird reich durch Gefäßmaschen vascularisiert, die ganz bis an die Oberfläche der Epithelien vordringen (Schluckatmung). Die Schwimmblasenatmung der Dipnoer (z. B. Ceratodus) und jene des sommerschlafenden afrikanischen Lungenfisches (Protopterus) beruht auf der Ausnützung der reichvascularisierten Schwimmblase als Atmungsorgan und Gasreservoir. Nebenher besteht bei diesen Tieren noch die Kiemenatmung.

Tracheenkiemen findet man bei im Wasser lebenden Insektenlarven. Diese vermögen den Sauerstoff durch feinste Verästelungen der Tracheen aufzunehmen, die bis in die Kiemen hineinreichen.

Mannigfaltig sind die Einrichtungen für die Sauerstoffversorgung bei den auf dem Lande lebenden Wirbellosen. So findet man bei Landasseln ein Organ in den Hinterfüßen, das schon an eine Lunge erinnert. Ein Blutraum wird von feinsten, wie Bronchien verzweigten, dünnen Röhrchen durchsetzt und in diesen geht der Gasaustausch vor sich. Komplizierter sind die verschiedenen Formen der Tracheen, die in ihrer einfachsten Form (z. B. bei vielen Spinnen) unverzweigte, luftführende Röhren vorstellen, die in sogenannten Stigmen an der Körperoberfläche münden und reichlich von Blutgefäßen umsponnen sind. Durch Pumpwirkung wird die Luft aus- und eingetrieben und durch einen Verschlußmechanismus (z. B. durch Borsten oder ein Luftbläschen) wird das Eindringen von Fremdkörpern und von Flüssigkeit verhindert. In weiterer Vervollkommnung erfahren die Tracheen eine feine Verästelung, durch die der Gaswechsel der einzelnen Organe wesentlich begünstigt wird. Ein elastischer Chitinspiralfaden verhindert das Zusammenklappen der Röhrchen. Bei Schmetterlingen und Käfern sind die Tracheen ungemein fein verästelt und dringen bis in die Zellen, so auch zwischen die Muskelfibrillen und die Zellen der Leuchtorgane vor und versorgen das Gewebe direkt ohne Vermittelung des Blutes mit Sauerstoff. Endlich treten sackartige Erweiterungen an den verkürzten Tracheen auf, Tracheenlungen, die man bei einem Teil der Skorpione und Spinnen findet. Sie liegen unter der Haut und münden durch ein Stigma nach außen. Ihre Innenfläche ist durch zahlreiche Fächer geteilt, die von Blut durchflossen sind.

Die Atmung durch Lungen. Der Uebergang von der Wasseratmung und der fakultativen Luftatmung zur ausschließlichen Luftatmung hat bei den Wirbeltieren zur Ausbildung der Lungenatmung geführt. Beim Triton sind die Lungen noch durch zwei einfache Säcke gebildet, eine Einrichtung, die man schon bei Mollusken (z. B. Landschnecken) findet, je höher man aber in der Wirbeltierreihe emporsteigt, um so mehr erfahren die Lungen eine Gliederung

und Oberflächenvergrößerung. Unter Verschwinden des großen Binnenraumes wird die Lunge in eine ganze Summe von kleinen Bläschen mit eigenen zuführenden Luftwegen zerlegt, um die respiratorische Oberfläche möglichst zu vergrößern und den schädlichen Raum möglichst zu verkleinern. Vielfach ist die Lunge zugleich in einzelne, vollkommen gesonderte Lappen gegliedert worden. Die Lüftung der Lunge erfolgt bei den Amphibien (Frosch) im Wesen durch eine Schluckbewegung, wobei der Mundboden gehoben und die Luft in die Lungensäcke gepreßt wird, die Entleerung erfolgt durch die Bauchpresse. Bei den Reptilien geschieht die Einatmung durch Erweiterung des Thorax und inspiratorischen Saugzug, während bei der Exspiration die elastischen Kräfte des Thorax und der Lunge aber auch die Bauchpresse wirken. Auch Schluckatmung kommt bei den Reptilien vor. Bei Schlangen ist die linke Lunge verkümmert, die rechte ist der Körperform entsprechend sehr lang.

Die Vogellunge ist nicht elastisch. Zur Erreichung einer möglichst großen Oberfläche und möglichst günstiger Bedingungen für den Gasaustausch ist an Stelle der Alveolen ein zusammenhängendes, äußerst fein verästeltes Netzwerk von Atemröhrchen getreten, das mit respiratorischem Epithel ausgekleidet ist. Zwischen den Luftkapillaren liegen die Blutkapillaren. An die Lunge schließen sich die weitverzweigten, bis in die Extremitäten und zwischen die Wirbel, ja manchmal bis unter die Haut reichenden blutgefäßarmen Luftsäcke an, denen unter anderem die Aufgabe zufällt, bei der Inspiration die aus der Lunge gespülte, veratmete Luft des „schädlichen Raumes" aufzunehmen, um so dessen ungünstige Wirkung möglichst auszuschalten. Da die Luftsäcke nur wenige Blutgefäße besitzen, bleibt die Luft in ihnen doch noch stark sauerstoffhaltig. Wenn daher beim Vogel während der Exspiration die Luft der Luftsäcke durch die Lunge entleert wird, kann aus dieser noch Sauerstoff in das Blut übertreten, so daß auch während der Ausatmung die Lungenkapillaren mit Sauerstoff gespeist werden (Baer 1896). Die Inspiration erfolgt in Ruhe durch aktive Erweiterung des Thorax. Während des Fluges, findet ein Aufblasen der Lunge durch den gegen den fliegenden Vogel wirkenden Luftstrom statt. Von Zeit zu Zeit wird durch aktive Exspiration das Gas entleert. Dieses Aufblasen der Lunge ist möglicherweise der Grund, warum die Vögel (Condor), ohne geschädigt zu werden, in sehr große Höhen aufsteigen können (Doflein). Da die Luftsäcke bis in die Knochen der Extremitäten reichen, so kann man (z. B. bei Enten) vom durchtrennten Oberarm aus künstlich ventilieren.

Die Atmung der Säuger erfolgt inspiratorisch durch Saugzug unter Erweiterung des Thoraxraumes, exspiratorisch durch Ueberdruck, wobei elastische Kräfte die Hauptarbeit leisten (vgl. unten). Der Atmungsapparat des Menschen besteht aus den zuführenden Luftwegen, und der Lunge. Diese füllt zusammen mit dem Herzen beide Hälften der Brusthöhle aus. Die Lunge ist überzogen vom Brustfell (viscerales Blatt der Pleura), das auch die Innenwand des Brustkorbes (parietales Blatt) überkleidet. Die glatten Flächen des Brustfellüberzuges bewirken eine leichte, möglichst reibungslose Verschiebung der Lungenoberfläche an der Brustwand. Eine Duplikatur des Brustfelles (Mediastinum) sondert den linken und rechten Brustraum. Bis auf einen kleinen Ausschnitt, in dem das Herz sich an die vordere Brustwand herandrängt (Incisura cardiaca), liegt die Lunge überall der Innenfläche des Thorax an. Ihr caudales Ende (Basis) sitzt dem Zwerchfell auf. Die menschliche Lunge besteht aus 5 Lappen, von denen 3 in der rechten, 2 in der linken Thoraxhälfte liegen. Die Zuleitung der Luft erfolgt zur Lunge durch die Luftröhre (Trachea). Diese ist ein zylindrisches Rohr, das durch 15 bis 20 hinten offene Knorpelringe versteift und am Zusammenklappen verhindert ist. Die Schleimhaut der Luftröhre ist mit geschichtetem Flimmerepithel ausgekleidet und von zahlreichen Schleimdrüsen durchsetzt. Durch die Wimpern des Flimmerepithels wird eine stete, gegen den Kehlkopf zu gerichtete Strömung erzeugt, die die Aufgabe hat Staubpartikelchen aus der Luftröhre herauszubefördern. In der Höhe des 4. oder 5. Brustwirbels teilt sich die Trachea in die zwei Hauptbronchien, aus denen die kleineren Nebenbronchien hervorgehen. Diese sind sämtlich ebenfalls durch Knorpelringe versteift und mit Flimmerepithel tragender Schleimhaut überzogen. Die Wandung der Bronchien und Bronchioli enthält Bündel glatter Muskelfasern, die unter Nerveneinfluß stehen und bei ihrer Kontraktion das Lumen der Bronchien verengern. Die kleinsten Bronchioli (Bronchioli respiratorii) enthalten keine Knorpelspangen, sie sind teilweise nur mit einem platten Epithel ausgekleidet, das auf einer fast strukturlosen, von elastischen Elementen durchsetzten Membran aufsitzt. Die Enden dieser feinen Gänge tragen zahlreiche halbkugelige Bläschen, die Alveolen, die ebenfalls mit dünnem, teils kernhaltigem, teils kernlosem respiratorischem Epithel überkleidet sind und durch elastische Fasern gestützt werden. Der Durchmesser einer Alveole beträgt etwa 0,25 mm, die Zahl der Alveolen wird mit 300 bis 400 Millionen angegeben, woraus sich eine Oberfläche von un-

gefähr 100 m² ergibt. Die Alveolen und respiratorischen Bronchioli sind umsponnen von einem engmaschigen Netz von Blutkapillaren, dem venöses Blut durch die Verzweigungen der Lungenarterien zugeführt wird. Das abfließende, arterialisierte Blut strömt durch die Lungenvenen der linken Vorkammer des Herzens zu. Die größeren Gefäßstämme folgen in ihrem Verlauf den Bronchialästen; sie werden auch von den Nerven und den Lymphgefäßen für die Lunge begleitet. Die Dicke der von den Gasen bei ihrer Diffusion zwischen Blut und Lungenluft zu durchsetzenden Epithelschicht (Lungen- und Kapillarenepithel) wurde mit 0,004 mm gemessen (Zuntz-Loewy).

II. Die Mechanik der Lungenatmung.

Die Atembewegungen haben die Aufgabe, für eine hinreichende Durchlüftung der Lunge zu sorgen, und immer neue, nicht veratmete Luft in die Alveolen zu treiben, dagegen die an Sauerstoff verarmte, mit Kohlensäure beladene Lungenluft aus dem Körper zu entfernen. Da die Luft nur von einem Orte höheren Druckes gegen einen solchen niedereren Druckes strömen kann, müssen bei der Lungenatmung durch Muskeltätigkeit Druckdifferenzen geschaffen werden, um die verbrauchte Luft aus der Lunge auszutreiben und frische Luft einzusaugen. Die Tätigkeit der Atemmuskulatur führt entweder zu einer Erweiterung des Brustraumes (Inspirationsstellung) oder einer Verkleinerung desselben (Exspirationsstellung); die Lunge selbst beteiligt sich nur passiv an diesen Vorgängen, sie wird unter dem Saugzug der Inspirationsbewegung durch die nachdringende Außenluft entfaltet, und sinkt bei der Exspiration, indem sie das Gas aus sich herauspreßt, unter der Wirkung der elastischen Kräfte wieder zusammen.

Künstliche Atmung. Es gelingt auch bei vollkommener Lähmung der Atmungsmuskulatur durch mechanische, rhythmische Erzeugung von Druckdifferenzen, die zu einer abwechselnden Vergrößerung und Verkleinerung des Brustraumes führen, eine künstliche Atmung zu unterhalten, die in ihrer Wirkung vollkommen der natürlichen entspricht. Man bedient sich dabei z. B. eines Blasbalges oder einer Luftpumpe und verbindet die Luftröhre mit einem rotierenden Hahn. Durch die Bohrung des Hahnes wird die Luft wechselweise unter Ueberdruck in die Lunge gepreßt oder unter der Wirkung der elastischen Kräfte des Thorax und der Lunge ins Freie ausgetrieben, so daß einer durch die aktive Arbeit der Pumpe herbeigeführten inspiratorischen Entfaltung eine passive Exspiration folgt, die ganz der natürlichen gleichzusetzen ist. Andere Autoren verwenden in- und exspiratorisch durch Saugen und Druck abwechselnd wirkende Pumpen. Es gelingt aber auch Tiere, durch konstanten, ununterbrochenen Luftstrom künstlich zu atmen (Meltzer); nach Loewy ist dies jedoch nur dann möglich, wenn man Sauerstoff verwendet.

Unter „Atemmechanik" faßt man zusammen: die Tätigkeit der einzelnen Muskeln, die bei Inspiration und Exspiration wirksam sind, die Lageänderungen des Thorax, die Geschwindigkeits- und Volumsänderungen der Atemluft und endlich die Veränderungen in den Drucken, die durch die Atembewegungen herbeigeführt werden.

1. Methodik der Untersuchung der Atemmechanik. Dem Studium dieser Vorgänge dient hauptsächlich folgende Methodik:

Zur Untersuchung der Lageänderungen des Brustkorbes bei der Atmung dienen die Stethometer, die Stethographen und Thorakographen, die mittels Hebel oder Luftübertragung die Verschiebung zweier Punkte des Thorax gegeneinander oder die Verlagerung einer Stelle des Thorax gegen einen fixen, seitlich vom Körper gelegenen Punkt registrieren. So kann auch die Insektenatmung aufgezeichnet werden (Regen 1911).

Querschnitts- und Umfangsänderungen des Thorax werden mit Apparaten bestimmt, die man ebenfalls als Thorakographen bezeichnet. Im Prinzip beruht ihre Wirkung darauf, daß die Enden eines Bandes, das um den Thorax gelegt ist, sich bei Vergrößerung des Thoraxumfanges voneinander entfernen. Läßt man die Enden an 2 Kautschukmembranen ziehen, die eine Luftkapsel verschließen, so wird durch den Zug an den Membranen die Luft in der Kapsel verdünnt, was durch das Luftübertragungsverfahren graphisch aufgezeichnet werden kann. Aehnlich wirkt der pneumatische Schlauch von Zuntz, der um den Thorax gelegt wird. Auf photographischem Wege können die Lageänderungen im Schattenriß ebenfalls zweckmäßig registriert werden. Ein neues Verfahren zur Messung der Veränderungen des Brustumfanges wurde von Oker Blom (1911) angegeben; es beruht darauf, daß mittels eines Registrierrades mit Zeigerwerk die Brustbewegungen während eines längeren Zeitraumes addiert werden.

Die Lageänderung der Lunge wird ermittelt auf Grund der Aenderung des Perkussionsschalles. Auch objektiv können die Aenderungen des Percussionsschalles registriert werden und zwar mit Hilfe des Mikrophones und des Saitengalvanometers oder durch die Uebertragung der Töne auf die Seifenblase (Arthaud 1908). Photographisch kann die Lageänderung durch die Röntgenaufnahme aufgezeichnet werden.

Ueber die Beteiligung der einzelnen Muskeln bei den Atembewegungen erhält man Aufschlüsse auf graphischem Wege, so z. B. beim Zwerchfell durch die Phrenographen (Rosenthal, Langendorff), die darauf beruhen, daß ein Hebel durch eine Bauchwunde dem Zwerchfell angelegt wird. Auch dadurch kann man die Zwerchfellbewegungen registrieren, daß man einen Ballon mit einer Sonde durch den Oesophagus in den Magen führt und dann aufbläht. Wird durch einen Faden,

der durch die Sonde nach außen zu einer Rolle mit Schreibhebel geführt wird, der Ballon an die Cardia herangezogen, so übertragen sich die Verschiebungen des Zwerchfells auf die Schreibvorrichtungen (Hultkrantz).

Durch Aufzeichnung der Stromesschwankungen, die das Zwerchfell in Ruhe und bei Tätigkeit zeigt, kann der Verlauf der Erregung im Zwerchfellmuskel bestimmt werden (Dittler 1910). Für die Untersuchung der Bewegungen der Intercostalmuskeln dient graphische Aufzeichnung vermittels Hebel oder Luftübertragung (Weidenfeld, R. du Bois-Reymond u. a.) sowie photographische Registrierung (François Frank); auch die Aufzeichnung der Aktionsströme fand Verwendung.

Die Bestimmung der Muskelkraft der Atemmuskeln wurde zum Teile so ausgeführt, daß der maximalste Ueberdruck oder der maximalste Saugzug bestimmt wurde, der von einem Versuchsindivid erzeugt werden konnte. Stigler verfuhr in ähnlicher Weise wie Hermann bei der Feststellung der Muskelkraft des Wadenmuskels. Er ermittelte das Gewicht jener Wassersäule, die einseitig von außen den Thorax belastend hinreicht, die Inspirationsbewegungen aufzuheben.

Die Arbeit der Atmungsmuskulatur läßt sich berechnen (Zuntz, Roeder und Reach 1909) aus der Größe des Umsatzes bei verschieden großer Ventilation auf Grund der von Zuntz angegebenen Methodik der Bestimmung des Gaswechsels (vgl. unten S. 698).

Die Wirkung der Bronchialmuskulatur kann man untersuchen, wenn man am Lebenden mit Hilfe des Lungenkatheters ein Gasvolum in der Lunge luftdicht abschließt oder im Tierexperiment eine Kanüle luftdicht einführt. Bringt man nun die Bronchialmuskeln zur Kontraktion, so beobachtet man eine Erhöhung des Druckes der eingeschlossenen Luft, die graphisch aufgezeichnet oder manometrisch gemessen werden kann (Donders, P. Bert). Es ist hierbei jedoch zu berücksichtigen, daß auch Aenderungen in der Blutfülle der Lunge eine Steigerung des Druckes herbeiführen können. Von Einthoven wurde ein Verfahren ausgebildet, das darauf beruht, den Druck zu messen, der beim Eintreiben einer bestimmten Luftmenge entsteht.

Zur Untersuchung der bei der Atmung zu berücksichtigenden Druckdifferenzen dienen die üblichen Manometer (Quecksilber-, Wasser-, Petroleum-Manometer), die mit dem Raume, in dem der Druck gemessen werden soll, luftdicht verbunden werden müssen. Bei Verwendung von Atemmasken, Schnauzenkappen und ähnlichem vermag man dieser Forderung meist nicht gerecht zu werden. Die Ausschläge der Manometer werden graphisch mit Schwimmern und Hebeln oder photographisch registriert. Bei Beobachtungen, über die während der Inspiration oder Exspiration auftretenden Drucke verwendet man meist seitenständige Manometer. Bei Druckmessungen an den Atmungsorganen ist stets zu bedenken, daß durch die Kompressibilität der Luft zu kleine Druckwerte vorgetäuscht werden können. Auch die Elastizität des Thorax, die Verschieblichkeit des Zwerchfelles und endlich die Abkühlung, welche die aus der Luftröhre ausströmende Luft erfährt, können die beobachteten Druckgrößen wesentlich beeinflussen. Während aus der mit einer bestimmten Druckänderung einhergehenden Volumsänderung bei einem durch starre Wandungen abgeschlossenen Luftquantum das ursprüngliche Gasvolum berechnet werden kann, ist dies aus den angegebenen Gründen bei der Lunge nicht möglich.

Der Druck im Pleuraraum kann durch Einführen luftdicht anschließender Kanülen zwischen das viscerale und parietale Blatt der Pleura auf manometrischem Wege bestimmt werden. Aehnlich verfährt man bei Ermittelung des Druckes im Mediastinalraum. Auch die Einführung von Ballonsonden führt zum Ziele, dagegen geben in den Oesophagus eingebrachte Ballonsonden zu niedere Werte für den Druck im Mittelfellraum. Für die Ermittelung des abdominalen Druckes können Sondenballons, die in den Magen oder das Rectum eingeführt werden, dienen, bei Eröffnung der Bauchhöhle wird man der Einführung von Kanülen den Vorzug geben.

Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit der Luft: Eine ungefähre Vorstellung über die Strömungsgeschwindigkeit der bei gegebenem Querschnitt in der Zeiteinheit passierenden Luft gibt schon die Beobachtung der Gasuhrzeiger, wenn die Luft einen Gasmesser passiert; auch am empfindlichen Anemometer läßt sich ein Urteil über die Geschwindigkeit des In- und Exspirationsstromes gewinnen und endlich gestattet auch die Druckkurve, die ein seitenständig angebrachtes Manometer verzeichnet, Rückschlüsse auf die Strömungsgeschwindigkeit. Da die mit den gewöhnlichen Atemschreibern gezeichneten Kurven kombinierte Volum- und Druckkurven sind, vermögen auch sie Andeutungen über die Geschwindigkeitsschwankungen zu geben. Der objektiven Registrierung der Strömungsgeschwindigkeit dient der Aerodromograph von Zwaardemaker und Ouwenhand. Bei diesem Instrument sind in die Strombahn zwei Pitotsche Röhrchen gestellt, von denen das eine mit seiner Oeffnung der Richtung des Luftstromes zugewandt, das andere abgewandt ist. Die Seitendrucke wirken durch diese Röhrchen auf zwei kleine, an einem Wagebalken aufgehängte und in Ligroin tauchende Spirometerglöckchen. Die Verschiebung des Wagebalkens graphisch aufgezeichnet, gibt die Geschwindigkeitskurve. Für exakte Messungen kann hierbei nur die photographische Registrierung empfohlen werden. Ein vereinfachter Apparat Zwaardemakers beruht darauf, daß der Luftstrom gegen die Kraft einer Spiralfeder wirkt, deren Dehnung ein Maß für die Geschwindigkeit gibt.

Methodik der Volumbestimmungen bei Untersuchungen an den Atmungsorganen: Die Zählung von Gasblasen, die bei unter Wasser gehaltenen und belichteten Pflanzen aufsteigen, ist wohl die einfachste und ursprünglichste Art die Größe eines Gaswechsels quantitativ zu beurteilen. Bei Tieren und Menschen, bei denen aus

freier Luft hin und her geatmet wird, und bei welchen die Gasmengen relativ groß sind, dienen zur Volumsbestimmung eigene Apparate, die in neuester Zeit auch für die Untersuchung geringster Gasmengen so vervollkommnet worden sind, daß es gelingt, selbst die Atmung kleinster Lebewesen messend zu verfolgen. Die hauptsächlich verwendeten Prinzipien sind folgende:

1. Das Spirometer (Hutchinson, Speck, Tissot u. a.). In einem äußeren, mit Wasser gefüllten Standgefäß steht ein innerer, durch Gegengewicht ausäquilibrierter Blechzylinder, in den die Luft vom Boden her durch ein Rohr, das bis in den obersten Teil des inneren Zylinders reicht, eingeführt wird. Wie bei den üblichen Gasometern hebt sich der innere Zylinder in dem Maße, als Luft in dessen Innenraum eintritt. Aus dem Betrag, um den sich der Zylinder verschoben hat, ergibt sich die Größe des zu messenden Gasvolums. Sollen die Angaben richtig sein, darf der innere Zylinder keinen schädlichen Raum besitzen. ferner muß die Aequilibrierung der Veränderung des Auftriebes durch das Austauchen des Zylinders genau angepaßt sein. Dies kann durch Quecksilber (Pflüger), herabfallende Kugeln (Speck) oder eine Kette (v. Recklinghausen) in ziemlich vollkommener Weise erzielt werden. Weitere Unrichtigkeiten können in den Angaben des Spirometers u. a. dadurch zustandekommen, daß der innere Zylinder sich schief stellt, daß die Temperatur der Luft sich nicht abgeglichen hat und daß Kohlensäure durch die Spirometerflüssigkeit absorbiert wird.

2. Die Gasuhren (Pettenkofer und Voit, Zuntz u. a.). In Verwendung stehen „feuchte" und „trockene" Gasuhren. Jene stellen im Wesen rotierende Spirometer vor, deren Gasräume konzentrisch um eine Achse für jede Lage äquilibriert angeordnet sind und sich abwechselnd füllen und entleeren, wobei die Achse gedreht wird und auf ein Zeigerwerk wirkt, das das durchgegangene Volum angibt. Gasproben für die Analyse dürfen nur vor Eintritt in die Gasuhr entnommen werden und sind dem Volum zuzuzählen. Druck- und Temperaturbestimmungen müssen die Angaben des Zeigerwerkes vervollständigen. Trockene Gasuhren dienen besonders dann der Volumsbestimmung, wenn der Gasmesser bequem transportabel sein soll. Bei ihnen wird durch wechselnde Füllung und Entleerung von Lederbälgen das Zeigerwerk in Bewegung gesetzt. Trockene wie feuchte Gasuhren müssen geeicht werden und bedürfen von Zeit zu Zeit der genauen Kontrolle über ihre Angaben. Ganz besonders ist dies bei trockenen Gasuhren erforderlich. Die Eichungswerte lauten für verschiedene Durchgangsgeschwindigkeiten verschieden und müssen bei der Bemessung der Volumina in Rechnung gestellt werden. Bei trockenen Gasuhren ist zu berücksichtigen, daß die Messung kleiner Volumina dadurch sehr unsicher werden kann, daß die Angaben des Zeigerwerkes für gleiche Bruchteile eines Liters wechselnd groß sind. Es liefert die Eichung daher nur bei Durchgang größerer Gasmengen konstante Werte, die zur Ableitung eines mittleren Korrekturfaktors führen. Es ist nicht wohl möglich, eine Gasuhr mit Hilfe einer zweiten verläßlich zu eichen, weshalb für die Eichung eigene Apparate in Verwendung stehen.

3. Die Wägung der Gase. Unter Luftabschluß aufbewahrte Mengen von Atemgasen können entweder direkt durch Wägung bestimmt werden (Benedict u. a.), indem man auf entsprechend tragfähigen, empfindlichen Wagen das Gewicht des Gases ermittelt (z. B. 1 l O_2 wiegt 1,43 g, was bei einer Empfindlichkeit der Wage auf 2 mg einer Genauigkeit von 2 ccm entspricht), oder man fängt das Gas unter atmosphärischem Druck bei genau bekannter Temperatur auf und bestimmt als Wassergewicht das Volum jenes Raumes, den das Gas einnimmt (Durig). Hierbei ist auf den Temperaturausgleich und auf Verluste an Gas durch Absorption im Wasser Bedacht zu nehmen. In vielen Fällen wird das Gas in seinen Verbindungen gewogen, indem man die Gewichtszunahme des „Absorptionsmittels" bestimmt (z. B. Kohlensäureapparate). Auch durch Titrierung kann der Kohlensäure- und Sauerstoffgehalt eines Gases bestimmt werden. Die Titrierung ist am meisten bei der Untersuchung des Wassers auf CO_2 und O_2 üblich.

4. Die Volumsbestimmung durch Druckänderung geschieht entweder in der Weise, daß das zu messende und ein bekanntes Vergleichsvolum auf ein und dasselbe Manometer wirken, oder es wird das zu messende und abgesperrte Gas unter verschiedenen Druck gesetzt und aus der Höhe der Drucke beziehungsweise der damit verbundenen Volumsänderung die Gasmenge berechnet (Messung bei konstantem Druck oder bei konstantem Volum). Das Volumen einzelner Atemzüge kann auf die Weise bestimmt werden, daß das gesamte, während einiger Exspirationen ausgeatmete Gas in einem dichten Kautschukbehälter aufgefangen und aus diesem dann zur quantitativen Volumsbestimmung entnommen wird. Meist bedient man sich zur Kontrolle über die während der Atmung ablaufenden Volumsschwankungen der graphischen Aufzeichnung mit Hilfe der verschiedenen Atemschreiber. Die meisten dieser Apparate gestatten allerdings nur indirekte Schlüsse auf die Größe der Atemvolumina, da die aufgezeichneten Exkursionen der Schreibhebel nicht in allen Lagen genau aliquoten Teilen der Ventilationsgröße entsprechen. Das von Gad angegebene registrierende Spirometer, der Aeroplethysmograph, gibt zwar an und für sich richtige Werte, kann aber darum zur Volumsbestimmung nicht einwandfrei verwendet werden, weil das Tier entweder durch Ventile atmen muß, wenn die Inspirations- von der Exspirationsluft getrennt werden soll, oder aber gezwungen ist, in den Apparat (allenfalls mit Vorlage) hin und her zu atmen. Im erstgenannten Falle wird die Atemmechanik bei kleinen Tieren durch die Widerstände wesentlich geändert, im zweiten werden durch die Anreicherung an CO_2 veränderliche Bedingungen geschaffen. Schließt man das Versuchstier in einem Kasten luftdicht ein und läßt es durch ein Rohr nach außen atmen (Menschendose Pflügers; plethysmographische Methode Herings; Atemkasten Knolls), so geben die Volumsänderungen im Luftraum

des Kastens, die graphisch durch das Luftübertragungsverfahren oder den Aeroplethysmographen aufgezeichnet werden können, ein ziemlich gutes Bild, von dem Verlaufe der Atmung. In der Regel wird zur Aufzeichnung der Atmung ein Teilstrom verwendet, den man seitlich von der gedrosselten In- und Exspirationsleitung abzweigt und auf ein Registrierinstrument wirken läßt. In anderen Fällen atmet das Tier durch eine große Vorlageflasche von der eine Zweigleitung zum Registrierapparat führt. Zur Aufzeichnung werden verwendet der erwähnte Aeroplethysmograph, der besser aus paraffiniertem Papier hergestellt wird (Fuchs, Kahn) oder der Bellow Recorder von Brodie (vorteilhaft modi iziert von Maass 1910) ein Apparatchen, das wie ein kleiner Blasbalg wirkt, dessen Exkursionen aufgeschrieben werden, ferner der Piston Recorder, dessen Verwendbarkeit allerdings dadurch wesentlich eingeschränkt ist, daß Undichtigkeiten oder geringste Reibung durch Stäubchen sehr leicht zu Verschiebung der Abszissenachse und künstlicher Aenderung der Exkursionsgröße führt. Ein leichtes proportional ausschlagendes und zur Registrierung geeignetes Spirometerchen ist neuestens von Straßburger (1911) empfohlen worden. Bequem zur Aufzeichnung von Volumsschwankungen sind die vielfach gebräuchlichen Mareyschen Kapseln; diese verzerren jedoch die Volumskurven, und zwar besonders dann, wenn die Ausschläge groß und die Trommeldurchmesser klein sind.

Die Bestimmung der Mittellage, der Vitalkapazität, der Komplementär-, Atem- und Reserveluft (s. Seite 681) erfolgt mit dem Spirometer oder mit der Gasuhr. Zweckmäßig wird dabei die Nase durch eine Klemme verschlossen. Die Residualluft (vgl. S. 681) kann nicht direkt gemessen werden; es ist nur möglich, sie auf dem Umwege über eine Berechnung annähernd zu ermitteln. Die Bestimmung erfolgt 1. auf dem Wege der Volums- und Druckänderung (Pflüger, Kochs) mit Hilfe der Menschendose oder dadurch, daß die Lunge. während die Versuchsperson in maximaler Exspiration verharrt, verbunden wird mit einem bekannten, unter Ueberdruck oder Unterdruck stehenden Luftquantum. Nach Druckausgleich wird die Druckänderung im System bestimmt. Beide Methoden können keine richtigen Resultate liefern; 2. durch Mischungsmethoden. Es wird nach vorhergegangener, maximaler Exspiration durch Hin- und Heratmen in einen Sack oder ein Spirometer ein bekanntes Gasgemisch gleichmäßig auf die Residualluft verteilt, wieder maximal exspiriert und aus der Zusammensetzung und der Menge des ausgeatmeten Gases durch eine einfache Mischungsrechnung das Volum der Residualluft ermittelt. Als Gase dienten Wasserstoff (Davy, Gerhard, Berenstein), Sauerstoff (Durig), Stickstoff (Müller, Berenstein).

Bestimmung des schädlichen Raumes. Die Bestimmung jenes Anteiles der ganzen Lunge beim Menschen, der sich nicht wesentlich am Lungengaswechsel beteiligt, vollzog A. Loewy durch Ausgießen des Bronchialbaumes. Haldane und Priestley berechneten die Größe des Raumes aus der Zusammensetzung der Alveolarluft und der Exspirationsluft. Siebeck (1910) verfolgte einen ähnlichen Gedankengang wie die letztgenannten, nur mischte er der Lungenluft Wasserstoff zu und bestimmte die Größe des schädlichen Raumes auf Grund der Zusammensetzung der Exspirationsluft.

2. Die Druckverhältnisse bei der Atmung. Die Luft kann nur dadurch, daß auf Grund von Arbeitsleistung immer wieder Druckdifferenzen geschaffen, werden in der Lunge ein und ausströmen. Diese Druckdifferenzen müssen hinreichend groß sein, damit das Druckgefälle ausreicht, daß der Ein- und Austritt der Atemgase sich mit genügender Schnelligkeit vollzieht. Es ist dabei zu berücksichtigen, daß die geschaffenen Drucke auch für die Ueberwindung der nicht unwesentlichen Reibungswiderstände aufkommen müssen, die sich bei der Strömung der Luft durch die engen Verzweigungen des Bronchialbaumes aber auch schon bei der Strömung durch die Nase und den Kehlkopf geltend machen. Je nach der Länge und Weite des Weges, den der Luftstrom bis zu den einzelnen Alveolen zurücklegen muß, sind die Widerstände in den einzelnen Partien einer Lunge recht verschiedene. Es müssen daher die Kräfte derart auf die Entfaltung der Lunge wirken, daß die Alveolen dennoch in allen Teilen möglichst ausgiebig und gleichmäßig entfaltet und durchlüftet werden. Dieser Bedingung wird beim Menschen und den Säugern dadurch entsprochen, daß die Lunge unter Dehnung ihrer elastischen Fasern dauernd bis zu einem gewissen Grade entfaltet ist und der Brustwand sowie dem Zwerchfell luftdicht aber beweglich anliegt. Die Dehnungsarbeit wird durch den äußeren Luftdruck geleistet, der auf die Innenseite der Alveolen wirkt. Dies hat zur Folge, daß der auf die innere Brustwand wirkende Druck kleiner sein muß als der Atmosphärendruck und zwar um jenen Betrag an Energie, der zur Ueberwindung der elastischen Kräfte, bei der Entfaltung der Lunge erforderlich ist; es ist dies auch jene Kraft, mit der die Lunge sich von der Brustwand zu retrahieren trachtet. Vermag Luft zwischen Lunge und innere Brustwand einzudringen, wie dies bei Verletzungen des Thorax der Fall ist, so kollabiert die Lunge vermöge ihrer Elastizität und es strömt so lange Luft durch die Wunde ein, bis Druckausgleich erfolgt ist (Pneumothorax) Eine entsprechende Luftmenge wie jene, die zwischen Brustwand und Lunge eingedrungen ist, muß beim Zusammenfallen der Lunge ausgepreßt und durch die Atemwege entleert werden. Verbindet man die Luftröhre eines toten Tieres luftdicht mit einem Manometer und eröffnet dann die beiden

Hälften des Thoraxraumes, ohne die Lunge zu verletzen, so zeigt das Manometer einen Ueberdruck an, der als annäherndes Maß jenes Druckes angesehen werden kann, der zur Entfaltung der Lungen nötig war (Donders-scher Druck). Die Differenz zwischen dem äußeren Luftdruck und dem auf die Innenwand des Thorax wirkenden Druck bezeichnet man unter negativem Vorzeichen als „intrathorakalen" Druck. Dieser muß um so größer sein, je mehr die Lunge überdehnt ist, um so kleiner, je weniger Energie auf die Entfaltung der Lunge verbraucht wird. Am Pneumothorax wird er 0, bei normaler Exspirationsstellung des Menschen beträgt er — 5 bis — 6 mm Hg, bei mäßiger Inspiration — 8 bis — 9 mm Hg, bei maximaler Inspiration — 30 mm. Bei sehr forcierter Inspiration kommt außer dem elastischen Zug der Lunge auch der negative Druck im Innern der Lunge in Betracht. Dieser erreicht dann erhebliche Werte, wenn die Außenluft bei der raschen Erweiterung des Thorax nicht hinreichend schnell in die Lunge einzuströmen vermag. Es summiert sich daher unter diesen Umständen zu der Druckdifferenz die durch die Entfaltung der Lunge bedingt ist noch jener Wert, um den der Druck in den Alveolen niedriger ist als in der umgebenden Luft. Es kann hierbei, besonders wenn die Glottis teilweise verschlossen ist, der intrathorakale Druck bis zu 100 mm Hg (negativ) betragen.

Die Bestimmung des intrathorakalen Druckes erfolgt durch Einführen von Kanülen in den Raum zwischen Lunge und Rippen (vgl. oben unter „Methodik"). Einseitige Durchtrennung des Brustkorbes führt nur zu einseitigem Pneumothorax, da die rechte und linke Thoraxhälfte durch das Mittelfell getrennt sind. Insolange auf einer Seite des Thorax der intrathorakale Druck nicht wieder hergestellt ist, folgt auf dieser die Lunge den inspiratorischen Bewegungen des Thorax nicht oder nur unvollkommen. Ist dafür Sorge getragen, daß nicht neuerlich Luft durch die Brustwand eindringt, so rückt die Lungenoberfläche unter Resorption des eingedrungenen Gases allmählich wieder an die Thoraxwand. Beim Gesunden ist im Pleuralraum keine Luft vorhanden, dagegen findet sich eine geringe Mengen von Flüssigkeit. Diese hat die Aufgabe die Lungenoberfläche und die Innenseite der Brustwand feucht zu erhalten, so daß sich die Pleura costalis leicht an der Pleura visceralis verschiebt. Der intrathorakale Druck kann dann positiv werden, wenn bei Verschluß von Mund und Nase oder bei Glottisverschluß durch kräftige Exspirationsbewegung die Luft in der Lunge kräftig komprimiert wird.

Bis zur Geburt liegt die Lunge der Innenwand des Thorax als luftleeres Organ an (Lungenstückchen, die nicht geatmet haben, sinken auf Wasser gebracht unter); es fehlt also ein intrathorakaler Druck. Auch dann, wenn die Lunge der Neugeborenen durch die ersten Atemzüge entfaltet ist, kommt der intrathorakale Druck nicht zur Ausbildung, da der Brustkorb so klein ist, daß die Lunge noch nicht über die Ruhelage überdehnt wird. Erst wenn mit weiterem Wachstum der Thorax schneller als die Lunge wächst, tritt der intrathorakale Druck auf (Hermann 1885). Die Vogellunge ist mit dem Thorax verwachsen; es fehlt also auch bei ihr der intrathorakale Druck. Dasselbe soll beim Elefanten der Fall sein.

Die Ueberdehnung der Lunge über die Ruhelage bedingt eine Vergrößerung der Atemarbeit, bei der Inspiration, dagegen eine Erleichterung der Exspiration. Aehnlich wirken die Druckverhältnisse auf die Herzarbeit und auf den Kreislauf. Ein Steigen des Saugzugs im Mediastinal- und Pleuraraum während der Inspiration hat ein leichteres Einströmen des venösen Blutes in die großen Gefäße des Thoraxraumes zur Folge, es unterstützt auch die Füllung der Hohlräume des Herzens, während Verminderung des Saugzuges oder allenfalls auftretender positiver Druck das Abströmen des Blutes aus dem Herzen und die Kontraktion der Herzmuskeln begünstigt aber die Füllung des Herzens erschwert (vgl. Johannes Müllers und Valsalvas Versuch in dem Artikel „Kreislauf des Blutes"). Auch die Strömung des Blutes durch die Lungengefäße wird durch die Druckverhältnisse im Thorax wesentlich beeinflußt (Tigerstedt 1893).

Bei Atmung unter vermindertem Luftdruck hält bei derselben Entfaltung der Lunge ein relativ größerer Anteil des äußeren Luftdruckes den elastischen Kräften das Gleichgewicht. Es ist anzunehmen, daß dadurch die mögliche maximale Erweiterung des Thorax vermindert und die Vitalkapazität herabgesetzt wird.

Während der normalen Atmung sind die Druckänderungen im Luftraum der Lunge nicht groß; immerhin findet das Nachströmen der Luft bei Erweiterung des Brustkorbes während der Inspiration so langsam statt, daß man manometrisch in der Trachea einen deutlichen Saugzug nachweisen kann, wogegen exspiratorisch ein Ueberdruck beobachtet wird. Beim Hunde wurden ± 3 mm Hg (Kramer), beim Menschen + 0,7 bis — 1,9 gefunden (Aron); niedriger sind die Schwankungen, wenn man an Nase oder Mund mißt. Als Druckänderungen an der Nasenöffnung des Menschen wurden von Donders — 0,7 inspiratorisch, + 0,5 mm Hg exspiratorisch ermittelt. Als maximaler Druck und

Saugzug bei geschlossenen Luftwegen an endständigem Manometer wurden Werte von — 30 bis — 120 mm inspiratorisch und + 80 bis + 160 mm exspiratorischer Druck bestimmt. Die Angabe, es seien exspiratorische Maximaldrucke von 256 mm erreicht worden, dürfte wohl darauf zurückzuführen sein, daß in diesen Fällen die Druckwerte durch die Wirkung der Wangenmuskulatur bei verschlossener Glottis erzeugt worden sind. Nach Mosso ist der Saugzug, der durch die Erweiterung des Thorax mit Hilfe der Rippen erreicht werden kann, größer als jener, der durch das Zwerchfell zu erzielen ist.

3. Die Atembewegungen. Die Inspiration erfolgt durch die aktive Tätigkeit der Inspirationsmuskeln; als solche wirken das Zwerchfell und ein Teil der Intercostalmuskeln. Bei angestrengter Atmung tritt die Wirkung der „auxiliären" Inspirationsmuskulatur hinzu, zu dieser sind beim Menschen zu zählen der Musculus serratus anterior magnus, der Musculus pectoralis major, der Musculus sternocleidomastoideus und der Musculus subclavius jeder Körperhälfte, sowie die Musculi scaleni. Durch die Wirkung der Inspirationsmuskeln wird der Fassungsraum des Thorax vergrößert.

Das Zwerchfell ist ein mächtiger platter Muskel, der teils in kräftigen Pfeilern, die gegen den Brustraum zustreben, an der Seite der Wirbelsäule entspringt, teils aus Muskelportionen besteht, die von den Rippen und dem Brustbein im ganzen Umfange der caudalen Thoraxapertur kurzsehnig entspringen. Alle diese Teile zusammen vereinigen sich zu einem Gewölbe, dessen Scheitel (Centrum tendineum) sehnig ist. Durch das Zwerchfell ist die Bauchhöhle vollkommen von der Brusthöhle getrennt. Der höchste Punkt der Zwerchfellkuppen liegt bei Männern in der Regel rechts in der Gegend des IV. Intercostalraumes, links an der 5. Rippe, bei Frauen um ein bis zwei Fingerbreiten höher. Die Wölbung bedingt, daß der Raum der Bauchhöhle auf Kosten der Thoraxhöhle vergrößert ist. Das Zwerchfell ist infolge des Retraktionsbestrebens der Lunge („Donders'scher Druck") und unter der Wirkung des abdominalen Druckes gegen den Brustraum vorgewölbt, indem es diesen verkleinert. Als dritte Komponente für die Stellung des Zwerchfelles ist die tonische Innervation seiner Muskeln zu betrachten. Die Zwerchfellkuppen liegen in Exspirationsstellung am höchsten beim Liegen, weniger hoch beim Stehen und am tiefsten beim Sitzen infolge Entspannung der Bauchdecken (Hofbauer und Holzknecht 1907).

Durch die Kontraktion der Muskelfasern werden die Kuppen des Zwerchfells etwas abgeflacht und es rückt beim Menschen wie bei vielen Tieren die ganze Scheidewand gegen die Bauchhöhle herab, wodurch der Brustraum vergrößert wird. Eine weitere Vergrößerung ist dadurch bedingt, daß die Seitenteile des Gewölbes mehr von der seitlichen Brustwand ab und gegen die Mittellinie zu rücken, so daß aus dem schmalen Spalt, der in Exspirationsstellung zwischen den Rippenportionen des Zwerchfelles und der Brustwand liegt, ein breiter Zwischenraum entsteht, in den sich die Lunge hineinschiebt. Diese Raumvergrößerung kommt bei schwacher diaphragmatischer Atmung allein in Betracht. Da mit dem Tiefertreten des Zwerchfelles die Baucheingeweide zurückgedrängt werden, findet zugleich mit der Inspiration eine Vorwölbung der Bauchdecken statt, die begleitet ist von einer Erweiterung der ganzen caudalen Thoraxapertur, so daß die Zwerchfellkontraktion nicht nur zu einer Verlängerung des Längsdurchmessers, sondern auch zu einer Vergrößerung des Querdurchmessers im Ausgange des Thorax führt. Bei den großen Haustieren steigen die Zwerchfellkuppen bei der Inspiration nicht so sehr nach abwärts, sondern es spannen sich die Muskelfasern derart an, daß das Zwerchfell zeltdachartig von den Seiten gegen einen Giebel ansteigt, der fix in der Gegend des Durchtrittes der Vena cava inf. gelegen ist. Die Kontraktion der Zwerchfellmuskulatur ist eine tetanische, sie läßt sich mit Hilfe des Nachweises der Aktionsströme in Einzelnerregungen auflösen. Der Rhythmus der Impulse ist derselbe wie im Nervus phrenicus und beträgt 60 bis 70 pro Sekunde. Auch während der Apnoe kann derselbe Rhythmus der Aktionsströme nachgewiesen werden. Die Stärke der Erregung beeinflußt den Rhythmus nicht, wohl aber ändert sich dieser mit der Temperatur.

Die auf die Rippen wirkenden Inspirationsmuskeln führen dadurch zu einer inspiratorischen Erweiterung des Brustkorbes, daß sie die Rippen heben, deren sternales Ened oralwärts führen, und damit den sagittalen aber auch den transversalen Durchmesser des Thorax vergrößern. Letzteres kommt dadurch zustande, daß die Rippen gelenkig mit den Wirbelkörpern und den Querfortsätzen verbunden sind, so daß eine Art Charniergelenk entsteht, dessen Achse derart schräg gegen die Wirbelsäule gestellt ist, daß dann, wenn sich das vertebrale Rippenende um diese Achse dreht, das freie Rippenende schräg nach vorwärts und lateral geführt wird. Da die Rippen mit dem Brustbein nur in knorpeliger Verbindung stehen und das Brustbein selbst in geringem Grade nachgiebig und beweglich ist, können die Rippen gewisse mäßige Exkursionen ausführen. Mit zunehmender Starrheit der Verbindungen wie mit

zunehmender Vergrößerung der Bewegung der Rippenenden wachsen die Widerstände, die der Erweiterung entgegenstehen stark an und zwar um so mehr, je mehr sich das Brustbein dabei verlagern muß. Dieses wird nämlich nicht bloß als Ganzes bei der Inspiration weiter von der Wirbelsäule entfernt, indem die in Exspirationsstellung nach rückwärts gelegten Rippenbogen bei der Einatmung aufgerichtet werden, sondern seine Lageänderung ist auch ungleich groß in den einzelnen Anteilen. Es weichen nämlich die Winkel, die die mehr caudal gelegenen Rippen gegen die Wirbelsäule bilden, viel mehr von einem rechten ab als jene der oral gelegenen Rippen und da erstere auch länger sind, ist ihre Lageänderung viel ausgiebiger. Ihr Anteil am Ausmaße der thorakalen Atmung ist darum auch ein viel größerer.

Die Frage nach der Wirkung der Muskeln und insbesondere nach jener der Intercostalmuskeln bei In- und Exspiration war lange Zeit strittig; sie kann heute als endgültig entschieden gelten. Die Musculi intercostales externi und die an der ventralen Seite gelegenen Teile der Musculi intercostales interni sind Inspirationsmuskeln. Besonders ausgiebig ist die Wirkung der Intercostales externi, sie wirken kräftiger auf die Ventilation als das Zwerchfell (Hultkranz). Die ventralen Interni unterstützen dadurch die Inspirationsbewegung, daß sie die Verlagerung der Rippenknorpel gegen das Brustbein begünstigen. Die Levatores costarum dienen nicht als Inspirationsmuskeln; sie wirken nur bei Rumpfbewegungen mit (R. Du Bois Reymond, R. Fick)). Nach manchen Autoren stellen die levatores costarum wichtige jedoch auxiliäre Inspirationsmuskeln vor (Rosenthal und Traube). Bei der Katze vermögen sie allein für die erforderlichen Inspirationsbewegungen aufzukommen (Koraen und Möller). Bei gesteigerter Ventilation treten jene Muskeln inspiratorisch in Funktion, die Wirbelsäule und Rippen zu Ursprungs- beziehungsweise Ansatzpunkten haben und als Heber der Rippen wirken, ferner solche Muskeln, die vom Schultergürtel an den Brustkorb ziehen und bei ihrer Kontraktion zur Erweiterung des Thoraxraumes führen, wenn der Schultergürtel fixiert ist. Zur erstgenannten Muskelgruppe sind zu zählen die Musculi scaleni, die von den Halswirbeln zu den obersten Rippen verlaufen, der Musculus sternocleidomastoideus, der vom Manubrium sterni und der Clavicula zum Hinterhaupt zieht und gemeinsam mit den nahe gelegenen Fasern des Trapezius auf Clavicula und Sternum wirkt, sowie der Musculus serratus posticus superior, der von der Halswirbelsäule an die 2. bis 5. Rippe herabgreift.

Bei fixiertem Schultergürtel (Anhalten am Bettrand bei Orthopnoe, oder am Geländer beim Stiegensteigen schweratmiger Personen) wirken als auxiliäre Inspirationsmuskeln der Musculus serratus anterior und pectoralis minor sowie die caudalen Portionen des Pectoralis major, durch Hebung des Schulterblattes die Musculi rhomboidei, der Trapezius und Levator scapulae. Das Zwerchfell beteiligt sich bei tiefer Atmung nur insofern als es durch tonische Kontraktion fixiert wird und so verhindert, daß es gegen den erweiterten Thoraxraum vorgebaucht wird. Man findet daher bei tiefer Atmung und forcierter Inspiration die Zwerchfellkuppen meist höher stehend als bei flachem Atmen (Hofbauer).

Die Exspiration ist gekennzeichnet durch die Rückkehr zur Ruhelage aus der aktiv bei der Inspiration herbeigeführten Stellung. Das Zwerchfell erschlafft und wird durch die unter dem Tonus der Bauchmuskeln nachrückenden Baucheingeweide emporgeschoben, die Lunge weicht zurück und das Zwerchfell legt sich mit seinen seitlichen Schenkeln wieder nahe an die Seitenwand des Thorax. Die Rippen bewegen sich bei dem Fortfall der Zugwirkung der Inspirationsmuskeln vermöge ihrer Schwere und durch die Wirkung der elastischen Kräfte in die ursprüngliche Lage zurück. Es ist fraglich, ob hierbei die lateralen und dorsalen Musculi intercostales interni aktiv mitwirken. Energische Muskelaktion tritt bei forcierter Exspiration ein. Es kontrahieren sich dann die Musculi recti und obliqui abdominis sowie der Transversus abdominalis und diese treiben zusammen die Baucheingeweide gegen den Thorax vor; zugleich werden die Rippen caudalwärts herabgezogen und so in zweifacher Weise der Thoraxraum verkleinert. Auch vom Rumpf und vom Schultergürtel an die Rippen tretende Muskeln können das Herabziehen der Rippen unterstützen und so exspiratorisch wirken. Zu diesen gehört der Musculus serratus posticus inferior, der Musculus ileo costalis, der Quadratus lumborum, der Sacro costalis und am Schultergürtel die oberen Partien des Musculus pectoralis major und des Musculus latissimus dorsi.

Ob übrigens bei ruhiger Atmung die Exspiration ausschließlich passiv verläuft und die Exspirationsstellung eine vollkommene Ruhestellung ist, wie man bisher angenommen hat, kann wegen der variablen Größe der Mittelstellung bezweifelt werden, auch der Nachweis tonischer Innervation des Zwerchfelles (Dittler) und der Umstand, daß die Kadaverstellung des Thorax nicht vollkommen der Exspirationsstellung entspricht, deuten darauf hin, daß während oder mindestens auf der Höhe der Exspiration aktive

Kräfte wirksam sind. Nach Fick sowie Bergerdal und Bergmann (1897) dürften bei manchen Tieren die Musculi intercostales interni auch bei ruhiger Exspiration in Tätigkeit versetzt werden. Bei der Schildkröte findet nach Fano und Fasola aktive Bewegung der Lunge durch ihre eigenen glatten Muskeln statt. Das Zwerchfell der Vögel besteht trotz des besonders großen Sauerstoffbedarfes dieser Tiere nur aus einer häutigen Membram, die sich an der Atmung nicht aktiv beteiligt.

Akzessorische oder konkomittierende Atembewegungen. Bei ruhiger, noch mehr aber bei angestrengter Atmung werden außer jenen Muskeln, die die Aufgabe haben Lageänderungen am Thorax hervorzurufen, noch eine Reihe weiterer Muskeln in Tätigkeit versetzt. Die Bewegungen, die diese herbeiführen, bezeichnet man als akzessorische oder konkomittierende und insofern sie den inspiratorischen Atembewegungen des Thorax vorangehen, als präinspiratorische Atembewegungen. Sie treten auch am abgeschnittenen Kopf auf und wechseln insofern bei künstlicher Atmung des Tieres als beim Aussaugen der Luft, das der Exspiration entspricht, inspiratorische akzessorische Bewegungen auftreten und umgekehrt exspiratorische Bewegungen beobachtet werden, wenn die Lunge aufgeblasen wird („perverse Atmung"). Hierher sind zu zählen die Bewegungen der Nasenflügel, die besonders beim Kaninchen deutlich sind, aber auch beim Menschen bei angestrengter Atmung immer beobachtet werden. Es findet inspiratorisch Erweiterung der Nasenöffnung, exspiratorisch Verengerung statt. Auch das Pferd stürmt im Laufe mit inspiratorisch geöffneten Nüstern einher. Lähmung der mimischen Nasenmuskeln hat bei ihm eine wesentliche Verminderung der Leistungsfähigkeit zur Folge. Auch der Kehlkopf nimmt an den Atembewegungen teil, er wird bei jeder Inspiration gesenkt, bei jeder Exspiration gehoben, doch ist es fraglich, ob es sich hierbei nicht um rein passive Verlagerungen handelt. Bei verstärkter Atmung — bei manchen Menschen und Tieren auch bei normaler Atmung — erweitert sich die Stimmritze inspiratorisch (Musculus crico arytaenoideus posticus).

Bei angestrengter, erschwerter Atmung beteiligen sich endlich immer mehr Muskeln; vorerst treten die auxiliären Muskeln in Aktion, dann folgen in immer größerem Umfange die Muskulatur des Mundes und die mimische Gesichtsmuskulatur; der Ausdruck des Lufthungers prägt sich in den Zügen aus und schließlich erübrigt fast kein Muskel des Körpers, der nicht mit innerviert würde (Orthopnoe). Die Hände halten sich festkrallend an einer Stütze an, die Arm- und Schultermuskeln fixieren die Ansatzpunkte am Schultergürtel, die Rumpfmuskulatur und Bauchmuskulatur ist in Tätigkeit und selbst die Beinmuskulatur ist gespannt im Bestreben zur Fixierung beizutragen. Beim Pferde macht sich die Erschwerung der Exspiration besonders durch das Auftreten der Dampfrinne (Ansatz des Musculus obliquus internus) und durch das Schlagen der Flanken geltend. Das sogenannte Afteratmen ist ein Zeichen der aktiven Wirkung der Bauchpresse bei erschwerter Exspiration.

Die Bronchialmuskeln erschlaffen bei gesteigerter Atmung exspiratorisch und verkürzen sich inspiratorisch. Sie sind tonisch innerviert. Durchschneidung der Nervi vagi erhöht durch Nachlassen des Tonus beim Pferde das Lungenvolum.

Atmungstypen. Je nachdem bei der Atmung mehr oder weniger ausgiebig unter Mitwirkung des Zwerchfelles ventiliert wird, unterscheidet man einen mehr abdominalen und einen mehr costalen Altemtypus. Die Frau atmet meist ausgiebiger mit Hilfe der Rippen, der Mann zeigt meist ausgeprägter Zwerchfelatmung. Die Ursache für dieses unterschiedliche Verhalten bei den beiden Geschlechtern scheint zum Teile auf die Hemmung der Zwerchfellatmung durch die das Abdomen beengende Kleidung zurückzuführen sein, zum Teile mögen die Sitte, Nachahmung und Erziehung daran schuld sein, da es nach unserer Auffassung unschön ist, eine Frau ausgesprochen abdominal atmen zu sehen. Indianerfrauen zeigen ausgesprochene abdominale Atmung wie der Mann; dasselbe kann man oft bei älteren Frauen auf dem Lande beobachten. Zu einem Teile mag auch die größere Starrheit des männlichen Thorax und der Unterschied in der Breite des Sternums mit in Betracht zu ziehen sein, da Knaben eine thorakale Atmung aufweisen. Im Liegen und im Schlaf ist auch beim Manne die Atmung überwiegend thorakal (Spannung der Bauchdecken?). Bei angestrengter Atmung verwischt sich bei beiden Geschlechtern der Atemtypus.

Die durch die Zwerchfellbewegung geförderte Luftmenge darf nicht überschätzt werden. Sie bleibt stets wesentlich hinter jener zurück, die durch Rippenhebung herbeigeführt wird. Nach Hultkranz verhält sich die durch das Zwerchfell geförderte Luftmenge zu jener, die durch die Intercostalmuskeln gefördert werden kann, wie 35:65. Selbst bei ausgesprochen abdominaler Atmung dürfte kaum mehr als $^1/_3$ der gesamtgeatmeten Luft auf die Zwerchfelltätigkeit entfallen. Die zeitliche Folge, in der sich die Erwei-

terung des Thorax durch das Heben der Rippen und die Kontraktion des Zwerchfelles vollzieht, ist keine gesetzmäßige; es bestehen nicht nur Unterschiede hierin bei ausgesprochen costaler, und abdominaler Atmung, sondern auch dann, wenn man den Verlauf der Atmung bei ein und derselben Person untersucht. Da die Atembewegungen in weitem Umfange durch den Willen beeinflußt werden können, kann auch der Typus der Atmung vorübergehend oder auf längere Zeit willkürlich verändert werden.

Die zeitliche Folge der In- und Exspirationsbewegungen. Ueber den Ablauf sich folgender In- und Exspirationen erhält man am besten Aufschluß durch die graphische Aufzeichnung der Atembewegungen (vgl. oben). Man spricht von normalen und modifizierten Atembewegungen. Bei der normalen Atmung erkennt man an der graphisch aufgezeichneten Atemkurve (Pneumatogramm), daß jeder Inspiration unmittelbar ohne Pause eine Exspiration folgt, an die sich sofort wieder eine Inspiration anschließt; meist zeigen die einzelnen sich folgenden Atemzüge keine wesentlichen Unterschiede in bezug auf Tiefe und Schnelligkeit. Nach manchen Autoren soll beim Menschen besonders im Schlafe eine kurze exspiratorische Pause vorkommen. Bei Tieren, insbesondere Kaltblütern und Insekten, werden oft lange andauernde in- oder exspiratorische Pausen beobachtet. Inspiratorische Pausen finden sich bei unter Wasser tauchenden Lungenatmern (z. B. bei Walen und Delphinen). Exspiratorische Pausen treten typisch auf in der Klasse der Reptilien, nämlich bei Sauriern, Ophidiern, Seeschildkröten und Krokodilen (hierüber wie über die Atmungsmechanik dieser Tiere vgl. Siefert in Pflügers Archiv Bd. 64 S. 321), und ganz übereinstimmend auffallenderweise auch beim winterschlafenden Murmeltier. Beim Menschen ist bei ruhiger Atmung die Dauer der Inspiration kürzer als jene der Exspiration.

Unter besonderen Umständen wird der gewöhnliche Rhythmus der Atembewegungen verändert, dies geschieht entweder durch die Willkür oder durch die Wirkung besonderer Reflexe. Man bezeichnet solche häufig beobachtete, typische, nicht mehr rhythmische Atembewegungen als „modifizierte" Atembewegungen. Zu diesen sind zu zählen: Das Husten, das eine willkürliche oder reflektorische, plötzliche und heftige Exspiration darstellt, bei der die unter erhöhten Druck gesetzte Luft plötzlich den Verschluß der Stimmbänder sprengt; das Räuspern ist dem Husten ähnlich, die Luft wird jedoch durch den verengten Raum zwischen Zungengrund und weichem Gaumen durchgepreßt. Das Nießen ist eine plötzliche, heftige, auf reflektorischem Wege herbeigeführte Exspiration durch Kontraktion der Bauchmuskeln und Emportreiben des Zwerchfelles; bei weit geöffneter Glottis wird der Luftstrom unter Druck gegen den verschlossenen Nasenrachenraum getrieben und dieser Verschluß gesprengt; die Luft wird dabei meist durch die Nase, seltener durch den Mund ausgetrieben. Schneuzen ist eine willkürliche, kräftige Exspiration durch die verengten Nasenöffnungen. Die genannten vorwiegend exspiratorisch wirkenden Atembewegungen haben den Zweck, Fremdkörper oder Schleim aus den Atemwegen zu entfernen.

Das Lachen wird durch kurze, schwache Exspirationsstöße herbeigeführt, welche die mehr oder minder gespannten Stimmbänder und den weichen Gaumen zum Mitschwingen veranlassen. Auch das Gurgeln ist eine exspiratorische Bewegung. Die Flüssigkeit, durch die der Exspirationsstrom tritt, gelangt dabei nicht hinter das Gaumensegel.

Inspiratorisch wirkende Atembewegungen, die hier anzuführen sind, stellen vor das Schnüffeln, das Seufzen und das Gähnen; letzteres ist eine tiefe, langgehaltene Inspiration bei weitgeöffnetem Gaumenverschluß unter Senkung des Mundbodens und Innervation der Tubenmuskulatur. Das Schluchzen (Singultus) ist eine krampfhafte, inspiratorisch wirkende Kontraktion des Zwerchfelles unter Schluß der Glottis und Emporsteigen des Kehlkopfes, das auf reflektorischem Wege ausgelöst wird und besonders leicht bei Erschöpfungszuständen schwer Kranker zustande kommt. Bei diesen versagen fast alle Mittel, den Ablauf des Reflexes hintanzuhalten. Das Auftreten des Singultus kann möglicherweise durch ein Ueberspringen der Aktionsströme des Herzens auf die Nervi phrenici erklärt werden, das zur Erregung der Phrenici führt. Von Eppinger und Rothberger wurden synchron mit jeder Systole distalwärts verlaufende Aktionsströme im Phrenicus beobachtet. Das Seufzen ist zu kennzeichnen als eine dem Schluchzen ähnliche, nur langsamer ablaufende Inspirationsbewegung. Zu den modifizierten Atembewegungen ist auch das periodische und das Cheyne-Stokessche Atmen zu zählen, das früher als rein pathologische Erscheinung (z. B. im Coma) aufgefaßt wurde. Das Cheyne-Stokessche Atmen besteht in einem allmählichen Anschwellen und Absinken der Atemtiefe, zwischen das oftmals auch Pausen eingeschaltet sind. Nach einer solchen Pause beginnt die Atmung mit erst kleineren, dann immer größeren Atemzügen, die, wenn sie ein Maximum erreicht haben, allmählich immer weniger tief werden, bis wieder eine Atempause eintritt. Das

Cheyne-Stokessche Atmen findet sich auch beim vollkommen gesunden Menschen mehr oder minder deutlich ausgeprägt z. B. unter vermindertem Luftdruck im Höhenklima (Mosso, Zuntz und Durig) oder in der Ebene nach vorangegangener willkürlich stark gesteigerter Atmung (Douglas und Haldane), auch bei einschlafenden gesunden Kindern kann periodisches Atmen nicht selten beobachtet werden (über die Ursache vgl. unten).

Die Atemfrequenz. Die Zahl der Atemzüge schwankt beim normalen Erwachsenen zwischen 6 und 25 Atemzügen pro Minute (bei Arbeit bis zu 70 Atemzügen). Als Mittelwert können für den Menschen in vollkommener Körperruhe 12 Atemzüge, beim nicht arbeitenden Menschen 16 (Körösy 1911) pro Minute gelten (Pferd 8 bis 16; Rind 10 bis 30; Schaf und Ziege 12 bis 20; Schwein 8 bis 18; Ratte und Meerschweinchen 100 bis 150; Huhn 40 bis 50; Taube 50 bis 70; Eidechse 4 bis 60; Grille 10 bis 36). Die Atemfrequenz wird beim Menschen schon durch die Aufmerksamkeit leicht beeinflußt; auch die Beobachtung durch eine zweite Person genügt, die Frequenz zu ändern. Kinder unter einem Jahre atmen am schnellsten. Neugeborene führen ca. 40 Atemzüge pro Minute aus (Gregor); Frauen atmen schneller als Männer, alte Leute schneller als Menschen mittleren Alters. Im Stehen wird rascher als im Sitzen und in diesem rascher als im Liegen geatmet. Die Jahreszeit ist ohne wesentlichen Einfluß auf die Frequenz, solange die Temperatur nicht sehr hoch ist. Steigerung der Bluttemperatur, Erschwerung der Wärmeabgabe vermehren die Zahl der Atemzüge (thermische Polypnoe). Im Höhenklima ist in großer Höhe die Frequenz meist vermehrt, es gibt aber auch Personen, bei denen diese Zunahme fehlt (Durig 1910). Bei der Arbeit ist die Atemfrequenz sehr gesteigert und zwar bis auf das Fünffache der Ruhefrequenz bei angestrengter Arbeit. Beim Trainierten wurde bei gleicher Leistung eine geringere Atemfrequenz beobachtet (Zuntz und Mitarbeiter 1906, Durig 1910).

4. Die durch die Atembewegungen bedingten Volumsänderungen. Die Lunge ist auch dann, wenn maximal ausgeatmet wird, niemals luftleer und es bleibt immer noch ein Rest von Gas in ihr zurück, selbst wenn man trachtet die Lunge durch Kompression luftfrei zu machen. Der nach vollkommenem Kollabieren bei geöffnetem Thorax in der Lunge zurückbleibende Rest von Luft wurde von Hermann als Minimalluft bezeichnet. Größer ist die nach willkürlicher, maximaler Exspiration in der Lunge verbleibende Menge, die als Restluft oder Residualluft bezeichnet wird. Diese ist darum von physiologischer Wichtigkeit, weil sie aus veratmeter Luft besteht, der die neu eingeatmete Frischluft zugemischt wird, so daß diese niemals mit ihrem vollen prozentuellen Sauerstoffgehalt in die Alveolen gelangen kann. Ihre Menge ist verschieden bei einzelnen Personen, aber auch je nach der Innervation der Bronchialmuskulatur bei ein- und derselben Person; sie muß ferner je nach der Geschicklichkeit, mit der die maximale Exspirationsbewegung ausgeführt wird, verschiedene Werte zeigen. Jene Vorgänge, die zu einer Verschiebung der Mittellage (Bohr 1908) Anlaß geben, vermögen durch gleichzeitige Aenderung des „schädlichen Raumes“ ebenfalls die Größe der Residualluft zu verschieben (Siebeck 1911). Als Mittelwert können etwa 1200 ccm angenommen werden. Mißt man jene Luftmenge, die bei gewöhnlicher, ruhiger Atmung bei jedem Atemzuge gewechselt wird, so findet man einen Wert von 500 ccm im Mittel; man bezeichnet dieses betreffende Volum als Atemluft. Durch maximale Inspiration kann aber ein größeres Luftquantum in der Lunge aufgenommen werden; dieses wird Komplementärluft benannt. Die Menge der Komplementärluft beträgt im Durchschnitt 1600 ccm. Jene Luftmenge, die nach ruhiger Exspiration durch eine maximale Ausatmung noch ausgetrieben werden kann, wird als Reserveluft bezeichnet; ihre Menge kann ebenfalls mit 1600 ccm im Mittelwert angegeben werden. Die Summe von Reserveluft, Atemluft und Komplementärluft stellt jene Luftmenge vor, die nach maximaler Inspiration bei größtmöglicher Exspiration entleert werden kann; man kennzeichnet sie durch den Namen Vitalkapazität. Die Größe der Vitalkapazität ist bei einzelnen Personen verschieden; sie schwankt zwischen Werten von 3500 und 4000 ccm, doch sind auch höhere und niederere Zahlen gefunden worden. Größere Vitalkapazität ist keinesfalls als ein Ausdruck größerer Leistungsfähigkeit anzusehen, ebensowenig sind Personen mit größerer Vitalkapazität besser geeignet Luftverdünnung zu vertragen (Mosso, Durig). Auch die vielfach behauptete Relation zwischen Körpergröße und Vitalkapazität ist keineswegs gesetzmäßig ausgeprägt, denn es gibt außergwöhnlich leistungsfähige große und sehr muskelkräftige Sportsleute, deren Vitalkapazität jene einer Frau nicht übersteigt. Wenn also die Vitalkapazität auch ein Maß für den größtmöglichen Umfang der Atembewegungen vorstellt, so ist sie doch kein Maßstab für die Möglichkeit der Deckung des Sauerstoffbedarfs. In der Mehrzahl der Fälle wird man jedoch dem Durchschnitte entsprechend annehmen können, daß Frauen und kleinere Individuen sowie schwächliche Personen auch eine geringere

Vitalkapazität besitzen. Mit zunehmender Starrheit des Thorax vermindert sich die Vitalkapazität, sie ist im Liegen geringer als im Stehen (Hasselbalch), und bei Ermüdung geringer als beim Unermüdeten. In größeren Höhen ist die Vitalkapazität unter dem Einflusse verminderten Luftdruckes verkleinert. Die Ursache dieser Abnahme ist nicht vollkommen geklärt (Wirkung der Darmgase, Zuntz; Temperatur, Fuchs; Druckverhältnisse, Durig 1910).

Die Summe von Residualluft und Reserveluft wechselt nach Bohr (1908) je nach der Tiefe der Atmung, sie wird insbesondere bei Muskelarbeit verschoben. Bohr bezeichnet die dadurch bedingte Ruhestellung in Exspiration als Mittellage, das Volum als Mittelkapazität; diese kann mit etwa 3 Litern im Durchschnitt angenommen werden. Intensive Muskelarbeit vergrößert die Mittelkapazität. Ein direkter Zusammenhang zwischen der Größe der Vitalkapazität und jener der Residualluft besteht nach Bohr nicht.

Für die Größe des Gasaustausches kommt noch jener Raum im ganzen Atemapparat in Betracht, der nicht mit respirierendem Epithel ausgekleidet ist nämlich jener der zuführenden Luftwege. Diese sind nur in untergeordneter Weise beim Gaswechsel zwischen Blut und Gewebe beteiligt. Die Größe dieses „schädlichen Raumes“ wurde von A. Loewy mit rund 140 ccm als einem Näherungswert bestimmt, der aber eher als eine obere Grenze anzusehen sein dürfte (Loewy und v. Schrötter). Nach den Untersuchungen Siebecks (1911) dürfte dieser Wert bei ruhiger Atmung in vielen Fällen in der Tat ungefähr dem wahren Verhalten entsprechen; es geht jedoch aus seinen Beobachtungen hervor, daß die Mittellage wie auch die Innervation der Bronchialmuskeln von wesentlichem Einfluß auf die Größe des schädlichen Raumes ist, der nach seinen Angaben in extremen Fällen zwischen 90 und 200 ccm schwanken kann.

Die Größe des Luftwechsels und der Ventilation. Die Größe der geförderten Luftmenge ist bedingt durch das Zusammenwirken der Atemtiefe und der Atemfrequenz. Die Größe der Ventilation ist aber keineswegs allein ausschlaggebend für die Ausgiebigkeit des Luftwechsels in den Alveolen.

Bei gegebener Ventilationsgröße ist der Erfolg der Durchlüftung wesentlich verschieden, je nachdem tief und selten oder flach und frequent geatmet wird. Werden bei flacher und frequenter Atmung zur zurückgebliebenen, verbrauchten Luft nur 140 ccm frischer Luft bei. jedem Atemzuge zugemischt, so kann von diesen kaum etwas in die respirierenden Alveolen gelangen, mag die Frequenz der Atemzüge noch so häufig und das geförderte Volum noch so groß sein. Ein Mensch würde bei solcher Atmung, die in der Hauptsache nur zu einem Gasaustausch in Luftröhre und Bronchien führt, ersticken. Dasselbe ist der Fall, wenn man kleinere Tiere durch eine Rohrleitung ein- und ausatmen läßt, deren Fassungsraum der Atemtiefe des Tieres gleichkommt (Röhrenatmung). Bei einer Ventilation von 500 ccm gelangen beim Menschen nur ungefähr 360 ccm Luft in die Alveolen und mischen sich der Summe von Residual- und Reserveluft zu. Nimmt man diese zu 2800 ccm an, so ergibt sich, daß der verbrauchten Luft auch bei normaler Atmung nur etwa $^1/_8$ ihres Volums an Frischluft zugemischt wird.

Die Atemtiefe. Jene Luftmenge, die mit jedem einzelnen Atemzug gefördert wird, schwankt je nach Umständen in weiten Grenzen. Für den erwachsenen Mann ist als Atemtiefe in Körperruhe ein Mittelwert von rund 500 ccm anzusetzen. Kinder im ersten Lebensjahre atmen nach der Geburt etwa 40 ccm pro Atemzug, am Schlusse des ersten Jahres steigt die Atemtiefe auf 78, im zweiten auf 130, im achten Jahr auf 200 ccm (Gregor 1902). Mäßige Erhöhung der Umgebungstemperatur ist ohne wesentlichen Einfluß auf die Atemtiefe. Zufuhr von Kohlensäure in die Inspirationsluft führt zu Steigerung der Atemtiefe (Loewy 1895, Zuntz). Unter vermindertem Luftdruck findet bei vielen Personen eine Steigerung der Atemtiefe statt, bei manchen fehlt diese. Arbeit erhöht die Atemtiefe und zwar bis über das Dreifache des Ruhewertes bei angestrengter Atmung. Im Sitzen ist die Atemtiefe größer als im Liegen, im Stehen größer als im Sitzen. Auch während der Verdauung steigt häufig die Atemtiefe. Unter vermindertem Luftdruck wurde selbst bei angestrengter Atmung die Atemtiefe nicht höher gesteigert als in der Ebene ja sie blieb hinter den in der Ebene beobachteten Werten zurück, obwohl das pro Atemzug geatmete Volum nicht einmal die Hälfte der Größe der Vitalkapazität erreichte. Es stehen also weitergehender Vertiefung der Atmung mächtige Hindernisse entgegen, die auf dem Anwachsen der Deformationsarbeit oder auf den Hemmungswirkungen der Vagi (s. u.) beruhen dürften (Durig 1910).

Das Minutenvolum oder die Ventilationsgröße ist jene Gasmenge, die pro Minute geatmet wird. In vollkommener Muskelruhe werden von einem erwachsenen Menschen 5 bis 8 l geatmet, geringfügige Muskelspannungen vermögen diesen Wert schon um 25% zu erhöhen (Zuntz, Johansson). Die Umgebungstemperatur (Sommer,

Winter) hat keinen gesetzmäßigen Einfluß auf das Minutenvolum, insolange nicht extreme Temperaturunterschiede vorliegen. Bei Steigerung der Körpertemperatur tritt Zunahme der Ventilation ein. Unter vermindertem Luftdruck (pneumatische Kammer) wie im Höhenklima nimmt bei geringer Druckabnahme auch das Atemvolum meist ab, bei großer Druckverminderung kommt eine Steigerung des „beobachteten Minutenvolums" zustande, das aber meist die in der Ebene beobachtete Größe nicht erreicht, wenn die Werte auf 760 mm Druck und 0° reduziert werden („reduziertes Minutenvolum"). Die Annahme einer Luxusventilation in der Ebene (Mosso) kann als widerlegt gelten. Eine Anpassung der Ventilationsgröße bei länger dauerndem Aufenthalt unter vermindertem Luftdruck wurde bisher nicht erwiesen. Für die Leistung gleichgroßer Arbeit wird unter vermindertem Luftdruck mehr ventiliert als in der Ebene, doch blieben die maximalen Werte für die Minutenventilation immer noch hinter jenen aus der Ebene zurück (Zuntz, Loewy, Müller, Caspari 1906, Durig 1910). Zunahme der Luftfeuchtigkeit, des Potentialgefälles oder der Luftionisation ist ohne nachweislichen Einfluß auf die Ventilationsgröße. Intensive Bestrahlung führt manchmal (Hasselbalch und Lindhard) zu einer Steigung der Ventilation, meist fehlt eine solche (Speck). Nahrungsaufnahme, insbesondere Zufuhr größerer Kohlehydratmengen, steigert die Ventilation (Magnus Levy 1894, Johansson 1909, Durig 1910).

5. Kraft und Arbeit der Atemmuskulatur. Untersucht man die Größe des maximalen Saugzuges und Ueberdruckes, der vom Menschen erzeugt werden kann, wenn man seine Nasenöffnungen (zur Vermeidung von Saug- oder Druckwirkung durch die Muskeln des Mundes) mit einem Manometer verbindet, so erhält man etwa 100 mm Saugzug und 150 mm Ueberdruck als Mittelwert, was einer inspiratorischen Kraft von 98 kg einer exspiratorischen von 147 kg entspricht (Du Bois Reymond); von Donders wurden viel höhere (jedenfalls zu hohe Werte), die auf 212 kg für die Inspiration und 233 kg für die Exspiration lauten, angegeben. Durch Stigler (1911) wurde festgestellt, daß ein unter Wasser getauchter Mensch, der Luft unter Atmosphärendruck atmet, den Thorax nicht mehr inspiratorisch zu erweitern vermag, wenn auf diesem ein Druck von 2 m Wassersäule = rund 150 mm Hg lastet. Geringe Ueberdrucke auf der Außenseite des Thorax wirken schon wesentlich erschwerend auf die Inspiration (Haldane 1909).

Die Größe der Atemarbeit wurde durch Speck (Loewy 1891, Zuntz 1898, Reach und Röder 1909) bestimmt, indem der Sauerstoffverbrauch als Maß für die Höhe der Umsetzungen bei der Leistung der Atemarbeit herangezogen wurde. Die gefundenen Werte besagen, daß für die Steigerung der Ventilationsgröße um 1 l rund 5 ccm Sauerstoff mehr verbraucht werden, allerdings spielt dabei die Atemtiefe eine wesentliche Rolle. Wird nämlich die Ventilation unter gleichzeitiger Vermehrung und Verflachung der Atemzüge gesteigert, so ist die Zunahme des Verbrauches für die Mehrventilation viel geringer als wenn das gesteigerte Volum durch sehr tiefe Atemzüge gefördert wird, was sich unschwer durch die Leistung größerer Deformationsarbeit bei tieferer Atmung erklären läßt. Nach Zuntz ist die Tagesleistung der Atemmuskulatur beim Menschen auf 25000 mkg anzuschlagen.

6. Die zuführenden Atemwege und deren Bedeutung. Die Luft wird bei der Nasenatmung durch die Nase, den Rachen und die Luftröhren den Bronchien und Alveolen zugeleitet. Bei der Mundatmung, die z. B. bei Vögeln, Amphibien usw., aber auch bei Pferden nicht vorkommt, tritt die Luft anstatt durch die Nasenöffnung durch die Mundhöhle in den Rachen. Bei der Nasenatmung passiert die Luft vorerst mit einem Teilstrom das Geruchsorgan, wodurch schädliche Beimischungen erkannt werden können, weiter schützt die Auslösung des Nießreflexes oder des Glottisverschlusses von der Nasenschleimhaut aus in zweckmäßiger Weise vor dem Eindringen von Fremdkörpern und ätzenden Dämpfen. Da die Luft an den mit Sekret befeuchteten Oberflächen der Nasenschleimhaut (hauptsächlich des mittleren Nasenganges) vorbeistreicht und wegen der Enge des Weges Wirbel bilden muß, findet auf dem Wege durch die Nase eine Erwärmung der Luft und Sättigung derselben mit Wasserdampf statt, außerdem schlagen sich Staubpartikel zu einem guten Teile auf der Nasenschleimhaut nieder, so daß befeuchtete, vorgewärmte, gereinigte und auf ätzende oder übelriechende Beimengungen geprüfte Luft den tieferen, zarter gebauten Luftwegen zugeleitet wird. Es kann daher als eine der Zweckmäßigkeit entsprechende Einrichtung angesehen werden, wenn sich bei schnell laufenden Tieren mit großem Luftverbrauch besonders lange Nasengänge ausgebildet haben (z. B. Pferde, Windspiel, Hirsch u. a.). Da die Schutzwirkung der Nase und die Erwärmung und Befeuchtung der Luft bei der Mundatmung zum größten Teile wegfällt, ist bei ihr die Gefahr einer Infektion oder einer mechanischen Schädigung des Lungengewebes erhöht. Im Pharynx prallt der Luftstrom an die hintere Rachenwand, durch die er in nahezu rechtem Winkel abgelenkt und dem Kehlkopf zugeleitet wird.

Von den Stimmbändern an, wo sich die engste Stelle der Luftwege findet, ist die Schleimhaut mit Flimmerepithel überzogen und durch Drüsensekret befeuchtet. Staubpartikel werden durch die oralwärts flimmernden Zellen zum Kehlkopf und von da durch Husten oder Räuspern weiter befördert. In zweckmäßiger Weise führt auch reflektorische Verengerung der Lichtung der Bronchien durch Kontraktion der glatten Muskeln zu besserer Reinigung staubhaltiger Luft. Staubteilchen, die bis zu dem respirierenden Teil der Lunge gelangt sind, werden durch vitale Zelltätigkeit (Leukozyten?) zu den bronchialen Lymphdrüsen befördert.

9. Perkussion und Auskultation. D i e V e r s c h i e b u n g d e r L u n g e n g r e n z e n b e i d e r A t m u n g. Durch das Tiefertreten des Zwerchfelles und das Abrücken seiner seitlichen Schenkel von der Thoraxwand verschieben sich die caudalen Anteile der Lunge inspiratorisch mehr bauchhöhlenwärts. Der caudale Lungenrand verlagert sich dabei beim Menschen in der Brustwarzen(Mammilarlinie) vorn vom unteren Rand der 5. Rippe zum oberen Rand der 7. Rippe, also um die Breite von ungefähr 2 Querfingern. Ebensoviel beträgt die Verschiebung am Rücken vom 10. Brustwirbel an caudalwärts. Auch die Lungenspitzen drängen sich seitlich über der Clavicula bei der Inspiration in breiterem Ausmaße vor (K r ö n i g sches Feld). Beklopft man eine Stelle des Körpers mit der Fingerkuppe auf aufgelegtem Finger (oder mit Hammer und Plessimeter) so hört man über einem luftführendem Hohlraum (z. B. über den Eingeweiden) einen Ton, dessen Höhe von der Form und Größe des Raumes abhängt (tympanitischer oder Trommelschall). Beim Beklopfen der Brustwand über der luftführenden Lunge hört man ebenfalls einen Ton, der aber darum, weil die Lufträume der Alveolen sehr klein sind, einen wesentlich anderen Charakter aufweist und als L u n g e n s c h a l l bezeichnet wird. Beklopft man Gewebe, in dem keine Lufträume enthalten sind, so ist der Schall ein „leerer“ (Beklopfen des Schenkels). Ist luftführendes Gewebe der Lunge minder lufthaltig geworden, so nähert sich der Lungenschall dem „leeren“, er wird „gedämpft“. Durch die Perkussion ist es möglich, die Grenzen des luftführenden Lungengewebes zu bestimmen. Verdichtungen werden durch die Dämpfungen des Schalles, größere Hohlräume (z. B. Cavernen bei Tuberkulose) durch tympanitischen Schall erkannt.

Wenn man das Ohr an den Brustkorb über der atmenden Lunge anlegt, so hört man bei der Inspiration ein schlürfendes Geräusch, ähnlich dem, welches zustande kommt, wenn man die Luft zwischen Unterlippe und Schneidezähnen einschlürft. Dieses Geräusch, das als „vesikuläres Atmen“ bezeichnet wird, ist vermutlich auf die Reibung der einströmenden Luft an den Wänden der kleinen Bronchien und Alveolen zurückzuführen. Bei der Exspiration ist das Geräusch kaum hörbar hauchend. Ueber der Luftröhre vernimmt man während der Atmung ein scharf hauchendes, an „ch“ erinnerndes Geräusch, das „bronchiale Atmen“, das auf der Bildung von Luftwirbeln in der Trachea beruht. Dieses Geräusch wird durch verdichtetes Gewebe fortgeleitet, so daß man es immer dort hört, wo infolge von Erkrankung Lungenpartien ihren Luftgehalt zu einem beträchtlichen Teile eingebüßt haben. Bei Kindern hört man ein rauheres vesikuläres Atmen als bei Erwachsenen, das sogenannte puerile Atmen. Passiert die Atmungsluft größere Mengen von Schleim, so daß es zur Bildung und zum Platzen von Schleimblasen kommt, so hört man an der Lunge das „Rasseln“, das einen sehr verschiedenen Charakter aufweisen kann.

III. Die Innervation der Atmung und das Atemzentrum.

1. Zentrifugale und zentripetale Bahnen. Die Atembewegungen stehen unter dem Einflusse des Nervensystems, der Vorgang der Atmung wird dominierend durch ein ausgedehntes, nicht streng lokalisiertes Zentrum beherrscht, von welchem aus Erregungen zentrifugal zu den Muskeln, die bei der Atmung beteiligt sind, geleitet werden und in dem Erregungen aufgenommen und auf andere Bahnen umgeschaltet werden, die von der Peripherie her im Zentrum einlangen. Zum Teile ist die Lunge der Ort, an dem die primäre Reizung der zentripetalen Fasern stattfindet, zum Teile treffen die Erregungen von der Sinnesoberfläche des Körpers her ein. Die folgende Darstellung beschränkt sich im wesentlichen nur auf den Menschen.

Z e n t r i f u g a l e B a h n e n: Der N e r v u s p h r e n i c u s entspringt aus dem III. und IV. Halsnerven und innerviert den Zwerchfellmuskel. Beim Kaninchen ist der Rhythmus der Impulse 50 bis 70 pro Sekunde. Die Nervi phrenici sind tonisch innerviert (D i t t l e r). Durchschneidung der Nervi phrenici führt zur Lähmung des Zwerchfelles. Ist der Brustkorb schon genügend starr und sind die Muskeln hinreichend kräftig, so wird nach Wegfall der Innervation des Zwerchfelles durch thorakale Atmung allein der Gaswechsel in zureichendem Ausmaß unterhalten. Jugendliche Kaninchen gehen nach Phrenicusdurchschneidung an Erstickung zugrunde, da sie bei jeder Inspiration das Zwerch-

fell gegen den Brustraum ansaugen. Auch erwachsene Tiere sind zu größerer Arbeitsleistung nicht mehr fähig, weil die geförderten Atemvolumina zu klein sind. Die Innervation der Intercostalmuskeln erfolgt vom 1. bis 12. Brustnerven aus; jene der mimischen Gesichtsmuskeln durch den Nervus facialis. Am Kehlkopf versorgt der Nervus laryngeus superior den Musculus cricothyreoideus, die übrigen Muskeln werden vom Laryngeus inferior versorgt. Die Nerven für die auxiliären Muskeln treten aus den Plexus cervicalis, brachialis und lumbalis (Bauchmuskeln) aus. Die glatte Muskulatur der Trachea und Bronchien erhält ihre Nervenfasern aus dem Vagus; die steht unter tonischer Innervation.

Zentripetale Nerven. Als solche kommen in erster Linie in Betracht die Nervi vagi, ferner kann die Erregung fast sämtlicher sensibler Nerven zentripetal dem Atemzentrum zugeleitet auf reflektorischem Wege zur Veränderung der Atmung Anlaß geben und endlich müssen auch jene Bahnen, in denen Erregungen vom Gehirne aus absteigend dem Atemzentrum übermittelt werden, diesem gegenüber als zentripetale bezeichnet werden. Diese vom Großhirn zum Atemzentrum laufenden Bahnen vermögen auf Grund willkürlicher Erregung Impulse dem Atemzentrum zuzusenden und dessen Tätigkeit zu beeinflussen (willkürlich modifizierte Atmung). Wird das Atemzentrum vom Gehirn isoliert, indem man den Hirnstamm in der Vierhügelgegend durchschneidet, so werden die Atemzüge etwas langsamer und vertieft. Durchtrennt man nun auch noch beide Vagi, so nimmt die Atmung fast stets einen krampfhaften, stoßweisen Charakter an. Es treten lange inspiratorische Atempausen ein und das Tier stirbt infolge ungenügender Ventilation (Marckwald 1889). Die Veränderung der Atmung ist hierbei eine vollkommen andere als wenn beide Vagi und beide Trigemini durchschnitten sind. Es kann also nicht der Ausfall der Trigeminusreflexe das Maßgebende für das Zustandekommen der beobachteten Erscheinungen sein (Loewy 1893). Es folgt daraus, daß zwischen der Medulla oblongata und dem Gehirn Faserverbindungen bestehen, durch welche Erregungen ablaufen, die bei der Regulierung der Atemtätigkeit von Bedeutung sind. Eine Bestätigung erfährt dieses Resultat durch die Erfahrung, daß die Reizung verschiedener Hirnpartien, insbesondere Reizung der Vierhügel und der Gegend des Aquaeductus Sylvii ebenfalls eine Veränderung der Atmung herbeiführt. Eine befriedigende Erklärung dieser Wirkungen steht derzeit noch aus. Vgl. auch später unter „Atemzentrum“ die Besprechung der Wärmepolypnoe.

2. Reflexe. Die wichtigste Reflexbahn für die Atmung ist jene durch die Nervi Vagi. Um Aufschlüsse über die Bedeutung der Nervi vagi für die Atmung zu erhalten, genügt Reizung und Durchschneidung der Nerven nicht. Insbesonders letztere führt zu Erscheinungen, die nicht eindeutig zu analysieren sind, da mit der Durchschneidung auch stets eine Reizung der Vagusfasern verbunden ist. Man hat daher getrachtet, die Vagi reizlos auszuschalten, doch auch hierbei wechselnde Ergebnisse erhalten je nachdem das Versuchstier narkotisiert war oder nicht (Fröhlich 1908). Als Ausschaltungsmethoden dienten Abkühlung (Gad), Ammoniak und Narkose (Fröhlich) oder Elektrotonus (Schenck 1903, Pflücker 1905). Als feststehendes Ergebnis kann erachtet werden, daß nach Wegfall der Leitung durch beide Vagi die Atmung inspiratorisch und exspiratorisch vertieft wird und die Zahl der Atemzüge abnimmt. Manche abweichende Angaben erklären sich dadurch, daß die Ausschaltung keine vollkommene oder keine ganz reizlose war, während in anderen Fällen die Wirkung der Narkose zur Geltung kam. Die Frequenz der Atemzüge erfährt nach beiderseitiger Vagusausschaltung eine wesentliche Verminderung, so daß trotz der Vergrößerung der Atemtiefe die geförderte Luftmenge annähernd dieselbe bleibt. Nach den Versuchen Boruttaus tritt am Hunde nach Vagotomie aktive Exspiration ein. Künstliche Reizung des zentralen Vagusstumpfes gibt sehr verschiedene Resultate, bald treten inspiratorische, bald exspiratorische Veränderungen auf (Rosenthal 1862, Lewandowsky 1898, Baglioni 1908). Die Wirkungsweise der Vagi ist gekennzeichnet durch den Ablauf zentripetaler Erregungen, die auf reflektorischem Wege zu einer Beschleunigung und Verflachung der Atembewegungen im Sinne größerer Oekonomie der Atemarbeit führen. Aufschlüsse über den Vorgang, um den es sich dabei handelt, haben die Untersuchungen von Hering und Breuer (1868) gegeben. Aus diesen geht hervor, daß Aufblasen der Lunge reflektorisch zur Auslösung einer Exspiration führt, während durch Ansaugen der Luft aus der Luftröhre Inspirationsbewegungen eingeleitet werden (s. o. perverse Atmung). Die Erklärung hierfür liegt in der Annahme, daß der Reiz der Dehnung der Nervenenden des Vagus in der Alveolenwand auf der Höhe einer Inspiration reflektorisch die Exspiration einleitet, während der Reiz, der die Enden beim Kollabieren der Lunge erregt, den Eintritt einer Inspiration herbeiführt, so daß durch diese Reflexe eine Steuerung der Atmung veranlaßt wird. Durch Ausschaltung beider Vagi

wird der Ablauf des Reflexes aufgehoben. Dasselbe erzielt man, wenn man eine Lunge durch Eröffnen der Pleurahöhle zum Collapse bringt und den Vagus der anderen Seite durchschneidet (Loewy 1888). Untersuchungen über die Aktionsströme im Nervus vagus ergaben insofern eine Bestätigung dieser Selbststeuerungstheorie, als beim Aufblasen der Lunge wie beim Aussaugen von Luft Stromesschwankungen im Vagus beobachtet wurden (Lewandowsky; Alcock und Seemann 1905; Einthoven 1908 u. a.), doch sind die beim Aussaugen auftretenden Aktionsströme so schwach, daß wohl nur bei sehr starker Exspiration ein inspiratorischer Reflex über den Vagus zu erwarten ist. Beim Aufblasen folgt das Elektrovagogramm dem Pneumogramm (Einthoven 1908). Die Wirkung der das Atemzentrum auf dem Wege der Vaguserregung treffenden Reize kann sich jedenfalls nur der Wirkung der übrigen, das Atemzentrum treffenden Reize superponieren, wobei die Feststellung der Größe des relativen Reizzuwachses durch die einlangende Vaguserregung von großer Wichtigkeit wäre. Die Leichtigkeit, mit der Cheyne-Stokessches Atmen erzeugt werden kann, die Veränderlichkeit der Atemtiefe (300 bis 2000 ccm) bei Ruhe und Arbeit, ja selbst bei geringfügigen spychischen Reizen besagt, wie leicht die Wirkung des Vagusreflexes durch andere Bedingungen verändert wird. Das Atemzentrum verfügt außerdem über seine eigene Automatie für den Rhythmus des Wechsels zwischen In- und Exspiration. Dafür sprechen nicht nur die Durchschneidungsversuche am Atemzentrum, sondern auch die Tatsache, daß beim curaresierten Tier rhytmisch Aktionsströme durch den Nervus phrenicus ablaufen (Winterstein 1911). Auch auf die von Bohr beschriebene Veränderung der Mittellage ist bei der Beurteilung der Steuerung durch die Vagusreflexe zu verweisen. Bemerkenswert ist, daß nach Scott (1908) nach beiderseitiger Vagotomie der Kohlensäuregehalt der Inspirationsluft ein höherer sein muß, um weitere Vertiefung der Atmung herbeizuführen.

Es ist möglich, Tiere nach beiderseitiger Vagotomie ziemlich lange (1½ Jahre) am Leben zu erhalten. Nicolaides (1906) beobachtete an Hunden nach 25 Tagen Wiederherstellung der normalen Atemfrequenz. Der Tod erfolgt nach beiderseitiger Vagotomie, wenn nicht interkurrente Erscheinungen auftreten, an lange überlebenden Tieren infolge von Veränderungen am Herzen aber nicht durch Störung der Atmung (Camis 1909). Mit der Funktion der Vagi steht auch der Ablauf der präinspiratorischen Atembewegungen in innigem Zusammenhang. Nach beiderseitiger Vagotomie hören diese Bewegungen bei Inspiration und Exspiration auf. Aufblähen der Lunge bei künstlicher Atmung führt, wie erwähnt, bei intakten Vagis zu exspiratorischen konkomittierenden Atembewegungen.

Bei Erregung peripherer Nerven wird die Atmung auf reflektorischem Wege bald beschleunigt, bald verlangsamt. Schwache Reizung peripherer, sensibler Nerven führt zu Beschleunigung und hauptsächlich inspiratorischer Vertiefung der Atmung, stärkere Reize erzeugen mehr exspiratorische Wirkungen, solche treten auch besonders bei Reizen auf, die die Bauchorgane treffen. Alle Erregungen, die auf das Auge oder das Geschmacks- der Geruchsorgan wirken, vermögen die Atemfrequenz und Tiefe zu beeinflussen; auch vom Labyrinth aus können bei Lageänderungen die Atemzüge verändert werden (Graham Brown 1909). Typische Atemreflexe werden bei manchen Leuten durch Reizung des Nervus opticus ausgelöst; bei ihnen stellt sich der Niesreflex ein, wenn sie gegen die Sonne sehen. Reizung der Nasenschleimhaut führt ebenfalls zu Niesreflex oder exspiratorischem Atemstillstand (Hering und Katschmer 1870) Abkühlung der Kopfhaut vermag Niesen oder Schluchzen reflektorisch auszulösen. Kräftige Reizung der Nasenschleimhaut durch NH_3-Dämpfe erzeugt Glottisverschluß, der bis zur Erstickung anhalten kann. Reizung der Rachen- und Kehlkopfschleimhaut führt über den Nervus laryngeus superior und inferior zum Hustreflex. Zugleich mit dem Schlucken wird reflektorisch über die Bahn des Nervus glossopharyngeus vorübergehender Atemstillstand herbeigeführt. Die meisten dieser Reflexe kennzeichnen sich als zweckmäßige, dem Schutz der Atmungsorgane dienende Einrichtungen.

3. Das Atemzentrum. Die Lage des Atemzentrums im weiteren Sinne ist gegeben durch die Summe aller jener Zentren, aus denen die einzelnen Nerven für die Atembewegungen entspringen. Die Untersuchungen am Atemzentrum haben ergeben, daß in diesem ganzen Gebiete, das vom verlängerten Mark bis zum Lendenmark reicht, eine mehr umgrenzte Stelle von besonders großem Einfluß auf die Atembewegungen ist, diese ist im verlängerten Mark gelegen und als Atemzentrum im engeren Sinne oder als dominierendes Atemzentrum aufzufassen. Durchschneidet man das Brustmark an einer Stelle, so fallen alle Atembewegungen weg, die caudal von dieser Stelle ausgelöst werden. Es verschwindet deshalb die Rippenatmung nach Durchschneidung des Rückenmarkes am 7. Halswirbel, wogegen die Zwerchfellatmung dabei keine irgendwie geartete

Störung erfährt. Auch dann, wenn man das Gehirn vom Kopfmark abtrennt, tritt nur auf einen Augenblick Stillstand des Zwerchfelles ein, das sich bald wieder rhythmisch zu kontrahieren beginnt. Die Nasenbewegungen bleiben aber dauernd erloschen. Bei einer Schnittführung, bei der das verlängerte Mark vom Halsmark getrennt wird oder bei der die Gegend des dritten Halsnerven durchschnitten wird, tritt Atemstillstand ein, was beweist, daß auch das Rückenmarkszentrum des Zwerchfelles in seiner Erregung abhängig ist von dem in der Medulla oblongata gelegenen höheren Zentrum. Zerstört man im verlängerten Mark eine umschriebene, am Boden der Rautengrube gelegene Stelle, so tritt plötzlich Atemstillstand ein, auch wenn sonst keinerlei Durchschneidung am Rückenmark vorgenommen wurde (Legallois 1811, Flourens 1842). Man bezeichnete diese Stelle als Lebensknoten. Das Resultat des Experimentes ist aber noch kein Beweis, der zwingend für die Annahme spricht, daß in der Medulla oblongata oder im Lebensknoten selbst das Atemzentrum zu suchen sei, da der Atemstillstand sehr wohl infolge des operativen Eingriffes durch Hemmung zustande kommen kann (Shock). Für diese letztere Annahme (Brown Sequard 1858) spricht der Umstand, daß es gelingt, auch bei Tieren, deren Medulla oblongata isoliert ist, wieder rhythmische, spontane Atemzüge zu erhalten (Rückenmarksatmung), wenn hinreichend lange nach der Operation künstlich geatmet wird (Langendorff 1887, Wertheimer 1886). Keinesfalls ist das dominierende Atemzentrum auf eine engumschriebene Stelle begrenzt, da nur dann, wenn die graue Substanz am Boden des vierten Ventrikels in bedeutendem Umfange zerstört wird, wirklich Stillstand aller Atembewegungen eintritt. Dieser Umstand, wie die Tatsache, daß nach halbseitiger Durchtrennung des Halsmarkes vielfach kein Atemstillstand auf der gleichnamigen Seite eintritt, spricht gegen die Richtigkeit der Shockhypothese, und zwar um so mehr, als die Atmung auf der Seite, auf der durchschnitten wurde, immer wieder auftritt, wenn der Nervus phrenicus der anderen Seite durchtrennt wird. Da die Rückenmarksatmung, wenn sie überhaupt eintritt, immer nur schwach ist und nur kurze Zeit besteht, kann als erwiesen angenommen werden, daß in der Medulla oblongata das dominierende Atemzentrum liegt, das von ausschlaggebender Bedeutung für die Regulierung der Atmung ist. Von mehr untergeordneter Bedeutung ist der im Rückenmark gelegene Teil des Atemzentrums, der unter besonderen Bedingungen die Rückenmarksatmung unterhalten kann. Das Atemzentrum ist in seiner ganzen Länge jedenfalls paarig angelegt (Volkmann 1842), es müssen zahlreiche Verbindungen zwischen den beiderseitigen Hälften des Atemzentrums bestehen. Dies ist dadurch zu beweisen, daß nach medianer Spaltung der Medulla oblongata die Atembewegungen auf beiden Körperhälften noch synchron, aber weniger ausgiebig als vor der Durchtrennung verlaufen. Selbst dann, wenn man halbseitige Durchschneidung der Oblongata ausführt, oder wenn nach Längsspaltung beide Vagi durchschnitten werden, findet noch in vielen Fällen keine asynchrone Atmung der beiden Brusthälften statt (Nicolaides 1907). Es dürften also im Gehirn oberhalb des Kopfmarkes noch Verbindungen zwischen den beiden Seiten bestehen, die für den Synchronismus der Atembewegungen von Bedeutung sind. Die Verbindungen der beiden Hälften des Atemzentrums sind jedenfalls nicht bloß auf das dominierende Zentrum beschränkt, sondern auch zwischen den Rückenmarkszentren ausgebildet (Nicolaides).

Die vom Zentrum in der Oblongata zu dem Rückenmarkszentrum verlaufenden Fasern liegen größtenteils im Vorderseitenstrang und im lateralen Teile des Vorderstranges.

Die Reizung und Erregung des Atemzentrums. Das Atemzentrum wirkt, wie aus dem Voranstehenden hervorgeht, automatisch, es kann von den übrigen Teilen des zentralen Nervensystems losgelöst sein und außer Kontakt mit allen zentripetalen Bahnen gesetzt sein, dennoch wird es den Anlaß zum Ablauf rhythmischer Atembewegungen geben. Die Erregung des Atemzentrums kann willkürlich bis zu einem gewissen Grade beeinflußt werden, doch ist eine willkürliche Erregung für die Tätigkeit des Atemzentrums nicht erforderlich, denn ein solcher Einfluß fehlt im Schlaf oder nach Durchtrennung des Hirnstammes in der Gegend der Vierhügel vollkommen. Die Erregung des Atemzentrums muß also auf Reize, die dieses direkt beeinflussen, zurückgeführt werden. Es ist die Beschaffenheit des Blutes, die als chemischer oder thermischer Reiz auf das Atemzentrum einwirkt. Auf die Reizgröße, die durch die Blutreize bedingt sind, superponieren sich die auf dem Wege der nervösen Bahnen einlangenden Reize, die je nach der Erregbarkeit des Atemzentrums oder je nach der Größe des Reizzuwachses mehr oder minder wirksam, eventuell ganz unwirksam sein müssen. Durch sie ist eine weitere, feine Regulation der Atemmechanik bedingt. Es liegt in der Tatsache, daß dauernd wirkende chemische Reize zu einem rhythmisch wechselnden Erregungszustand des Atemzentrums führen, nichts Befremdendes, da ein rhythmisches Ansprechen auf konstanten

Reiz im Tierreich auch sonst ziemlich allgemein verbreitet ist.

Der Nachweis, daß die chemische Reizung Erregung im Atemzentrum herbeiführt, ist zu erbringen durch die Auslösung des ersten Atemzuges beim Fötus (Pflüger). Der Embryo erhält, solange der Placentarkreislauf besteht, arterielles Blut durch die Nabelschnur. Wird jedoch die Zirkulation unterbrochen, so steigt unter Fortdauer der Verbrennungsvorgänge im kindlichen Körper der Kohlensäuregehalt des Blutes und es sinkt der Sauerstoffgehalt. Ist das Kind noch im Uterus, befindet es sich in der Vagina oder ist es eben geboren, so tritt immer, bei jeder Störung der Versorgung des Kindes mit frischem Blut auf dem Wege der Nabelvene, der erste Atemzug auf, dem dann, wenn die Bedingungen gegeben sind, der periodische Wechsel zwischen In- und Exspiration folgt. Auch dann, wenn der Mutter selbst durch mangelnde Luftzufuhr Erstickung droht, beginnt das Kind, das noch auf den Placentarkreislauf angewiesen ist, zu atmen. Ein zweiter experimenteller Beweis liegt darin, daß ein Tier, zu dessen Atemzentrum Blut aus einem zweiten Tiere durch die Carotiden zugeführt wird, erst verstärkt zu atmen beginnt, und Zeichen von Erstickung zeigt, wenn das zweite Tier durch Abklemmen der Luftröhre am Atmen behindert ist. Wird dem Gehirn arterialisiertes Blut zugeführt, fehlen die Erstickungserscheinungen an einem solchen Tiere auch dann, wenn seine Atmung unterbrochen wird (Fredericq). Daß hierbei durch periphere Nerven übermittelte Reize nicht in Betracht kommen, geht aus den Versuchen von Geppert und Zuntz hervor. Es zeigte sich, daß bei Tieren, bei welchen infolge von Rückenmarksdurchschneidung die nervösen Verbindungen zwischen der vorderen und hinteren Körperhälfte unterbrochen waren, immer dann Beschleunigung der Atmung eintrat, wenn das Hintertier tetanisiert wurde und Blut aus diesem ins Vordertier und ins Gehirn einströmte. Eine stärkere Erregung des Atemzentrums, die sich in einer Steigerung der Ventilation, und zwar insbesondere in einer Vertiefung ausdrückt, tritt dementsprechend auch dann ein, wenn Kohlensäure der Inspirationsluft beigemengt wird (Loewy) oder wenn ein Mißverhältnis zwischen Kohlensäureproduktion und Kohlensäureabgabe auftritt, das dazu führt, daß der Kohlensäuregehalt des Blutes ein größerer wird (Dyspnoe). Bei ruhiger Atmung stellt sich die Ventilation auf Grund der Reizgröße der Kohlensäure derart ein, daß bei ein und derselben Person unter sonst gleichen Bedingungen dieselbe alveoläre Kohlensäurespannung erreicht wird (Eupnoe), dieser Wert wird mit großer Konstanz eingehalten. Bei verschiedenen Personen ist jedoch die Erregbarkeit des Atemzentrums für die CO_2 nicht die nämliche, da man Schwankungen in der alveolären CO_2-Tension in der Ebene von 32 bis etwa 46 mm beobachtet (Haldane, Durig 1910 u. a.). Verminderung des Kohlensäurereizes führt zu Abnahme der Ventilation. Es kann durch überreichliche Atmung selbst dann, wenn nur mit Wasserstoff (Thiry 1865) oder Stickstoff geatmet wird, vorübergehend infolge von Reizmangel Atemstillstand erzeugt werden (Apnoe). Da die Apnoe schwieriger zu erzielen ist, wenn die Vagi durchschnitten sind, dürfte bis zu einem gewissen Grade auch die Ermüdung der Vagusenden in der Alveolenwand hierbei mitwirken, doch müßte bei reizloser Vagusausschaltung der Anteil der Vaguswirkung bei der Apnoe erst genauer analysiert werden. Manche Autoren trennen in eine Apnoe vera und Apnoe spuria (Miescher, Rüsch 1885). Erstere wäre charakterisiert durch CO_2 Mangel des Blutes, letztere würde auf eine Ermüdung des Atemzentrums gegenüber den Reflexen über die Nervi Vagi zurückzuführen sein. Eine derartige scharfe Trennung kann heute kaum mehr aufrecht erhalten werden. Es läßt sich am Hunde auch nach Vagotomie durch Wasserstoffatmung noch Apnoe erzeugen (Foá 1911).

Der Gehalt des Blutes an CO_2 ist es jedoch nicht allein, der chemisch reizend auf das Atemzentrum wirkt, denn man kann nach fortgesetzter Ausschwemmung von Kohlensäure aus dem Körper durch Wasserstoffatmung, also bei niederem Kohlensäuregehalt der Gewebe und des Blutes, doch eine Steigerung der Ventilation auslösen, die nur auf die Wirkungen des Sauerstoffmangels zurückgeführt werden kann. Unzweifelhaft beeinflußt die Sauerstoffzufuhr die Reizwirkung der CO_2 auf das Atemzentrum und zwar in dem Sinne, daß bei gesteigertem Sauerstoffgehalt des Blutes die Erregbarkeit des Atemzentrums für gleich große CO_2-Mengen herabgesetzt ist (Haldane und Douglas, Leimdörfer), dementsprechend werden viel höhere CO_2-Mengen in der Inspirationsluft vertragen, wenn gleichzeitig reichlich O_2 zugeführt wird. Auch die Apnoe ist nach der Einatmung sauerstoffreicher Luft verlängert. Wenn man nach forcierter Atmung länger den Atem anzuhalten oder größere Muskelarbeit zu leisten vermag, bevor Arbeitsdyspnoe eintritt, so ist dies dadurch bedingt, daß die Summe der Reize, die das Atemzentrum treffen, durch die Ueberventilation herabgesetzt wurde, indem Kohlensäure aus dem Körper ausgeschwemmt, der Sauerstoffdruck in der Lunge und die Sauerstoffmenge in

Plasma erhöht wurde (Hill und Flack, Douglas und Haldane). Sinkt die Sauerstoffspannung im Blute so weit, daß Zwischenoxydationsstufen auftreten, so wird die Ventilation erhöht und zwar auch dann, wenn die Kohlensäurespannung in den Lungen dadurch noch wesentlich tiefer sinkt; die Reizwirkung im Gefolge des Sauerstoffmangels ist nun dominierend geworden (Pflüger, Zuntz, Haldane, Durig u. a.). Eine Erklärung für dieses Verhalten liegt nach Lehmann (1888) und Winterstein (1911) darin, daß die wirksame Reizstärke für das Atemzentrum durch die Summe der Säurewirkung beziehungsweise die Summe der reizenden H-Ionen der Kohlensäure und der sauren Zwischenoxydationsprodukte gekennzeichnet ist. Für diese Annahme sprechen die Versuche im Höhenklima. Bei diesen hat sich gezeigt, daß die Größe der Ventilation, die in der Ebene bei Körperruhe nach der Höhe der Kohlensäurespannung in der Lunge genau geregelt wird, abhängig wird von Sauerstoffbedarf und Kohlensäureproduktion. Aber nicht nur bei verminderter Sauerstoffzufuhr, also auch im Höhenklima sondern auch bei Bildung reichlicher Mengen saurer Zwischenprodukte, wie dies selbst in der Ebene bei der Arbeit stattfindet, steigt die Ventilation annähernd proportional dem Sauerstoffverbrauch, soweit dies aus den bisherigen Versuchen hervorgeht (Durig 1910). Vergleicht man die pro mm CO_2-Spannung in der Lunge, im Höhenklima oder bei Arbeit in der Ebene geatmeten Gasmengen, so sieht man, daß gleichen Werten der CO_2-Spannung eine um so größere Ventilation entspricht, je niedriger die O_2-Spannung liegt. Es ist demnach bei der Bildung reichlicher saurer Zwischenprodukte wesentlich mehr geatmet worden als nach der Reizwirkung auf Grund der Kohlensäuretension in der Lunge zu erwarten wäre, so daß angenommen werden muß, daß die Regelung der Atmung in diesem Falle vorwiegend durch die Folgen des O_2-Mangels herbeigeführt wurde.

Einen Hinweis auf die Reizwirkungen im Atemzentrum liefert auch das periodische oder Cheyne-Stokessche Atmen, das nach Haldane und Douglas auf einer Inkongruenz der Gasspannungen im Gewebe, im Atemzentrum und in den Lungenalveolen beruht. Wenn man durch vorübergehende Ueberventilation den Kohlensäurebestand des Körpers vermindert und nachher die Atmung ohne willkürliche Beeinflussung der automatischen Erregung des Atemzentrums überläßt, tritt periodisches Atmen ein. Die Sauerstoffspannung liegt dabei anfänglich hoch, die CO_2-Spannung niedrig und es kommt zur Apnoe infolge von Mangel an Reizen. Hierdurch tritt allmählich infolge fehlender Ventilation Sauerstoffmangel ein und durch den Reiz der sauren Zwischenprodukte steigt die Ventilation, die durch ausgiebige O_2-Zufuhr zur Wegschaffung dieser Produkte führt, diese gesteigerte Ventilation verzögert aber wieder das Anwachsen der CO_2-Spannung im Gewebe auf den normalen Wert und bedingt sogar einen neuen Verlust an CO_2. Es kann also erst dann, wenn die CO_2-Spannung im Atemzentrum und in den Lungen auf einen normalen, einheitlichen Wert gestiegen ist und damit das ursprüngliche Gleichgewicht wieder hergestellt ist, das Cheyne-Stokessche Atmen nach Ueberventilation verschwinden. Ueber die Mengen von CO_2, die wieder zurückgehalten werden müssen, um die ursprüngliche Reizgröße des normalen CO_2-Bestandes wiederherzustellen, entscheidet natürlich die Dauer und der Umfang der vorangegangenen Ueberventilation. Auch unter vermindertem Luftdruck sinkt der Kohlensäurebestand des Körpers ab.

Wenn das Atemzentrum durch längere Zeit intensive Reize infolge von CO_2-Anhäufung oder Sauerstoffmangel treffen (Erstickung; Verblutung), tritt zuerst gesteigerte Erregung des Atemzentrums (Dyspnoe) auf, diese ist gefolgt von vorübergehendem Atemstillstand, der jedoch als Ausdruck einer gesteigerten Erregung hemmender Zentren anzusehen ist. Unter Lähmung dieser Wirkung treten dann noch vereinzelte, stoßweise Atembewegungen auf, die an die Atmung nach Vagusausschaltung erinnern. Unter vollkommener Lähmung des Atemzentrums tritt dann der Tod ein.

Außer durch chemische Reize wird das Atemzentrum durch die Temperatur des Blutes, von dem es durchflossen wird, gereizt. Erwärmt man das die Carotiden durchfließende Blut, so tritt eine Beschleunigung der Atmung ein (Fick und Goldstein 1872, Kahn), die auch mit wesentlicher Vertiefung verbunden sein kann. Hierbei tritt, wenn die Erwärmung hinreichend stark ist, die Wirkung der Temperatur insofern als eigener Reiz auf, als sie allein genügt, um auch bei niedriger CO_2 und hoher O_2-Spannung Atemzüge auszulösen. Es ist nicht möglich, durch Ueberventilation bei übererwärmtem Atemzentrum Apnoe zu erzeugen. Desungeachtet ist die Wirkung der chemischen Reize auf das Atemzentrum ungleich mächtiger, auf sie wird die Wirkung des Temperaturreizes nur superponiert, darum fällt die thermische Polypnoe fort, wenn der chemische Reiz hinreichend groß ist, dies ist der Fall, wenn die Inspirationsluft mehr als 2% CO_2 enthält (Langlois 1908). Nach Nicolaides und Donates (1911) kommt für die Wärmepolypnoe hauptsächlich ein Zentrum in den Corpora striata in Betracht. Wird die Verbindung zwischen diesem Zentrum und

der Medulla oblongata unterbrochen, so kann keine Wärmepolypnoe mehr erzeugt werden.

IV. Chemie der Atmung.

1. Die Blutgase. Bei den Tieren, die Blutgefäße und eine Zirkulation besitzen, findet der Gasaustausch sowohl an der Körperoberfläche wie im Darm und in der Lunge zum weitaus größten Teile auf indirektem Wege statt, indem das Blut als Ueberträger der Kohlensäure und des Sauerstoffs in den Vorgang des Gaswechsels eingeschaltet ist. Dadurch ist es erstens möglich, daß der Gaswechsel zu viel bedeutenderer Größe ansteigen kann und zweitens, daß jene Zellen, deren Gaswechsel sich sonst nur ungenügend vollziehen könnte, auf Grund dieser Arbeitsteilung aus dem Atemapparat Sauerstoff in hinreichender Menge zugeführt erhalten und sich ihrer Kohlensäure entledigen können. Eine Ausnahme hiervon bildet z. B. das Verhalten der Käfer, deren Muskelgewebe direkt mit Luft aus den Tracheen versorgt wird und selbst bei hohen Anforderungen an den Sauerstoffbedarf auch ohne Blut reichlich Sauerstoff zugeführt erhält. Unzweifelhaft findet auch beim höher stehenden Tiere, dort, wo sein Gewebe in direktem Kontakt mit der Luft oder mit Wasser steht, ein direkter Gasaustausch statt, dieser ist jedoch verschwindend klein gegen jenen, der durch Vermittelung des Blutes eingeleitet wird. Es bildet daher die Kenntnis des Verhaltens der Blutgase die grundsätzliche Voraussetzung für das Verständnis des Gasaustausches im Gewebe und in den Lungen des Menschen und der höheren Tiere.

1a) Methodik. Für die Untersuchung der Gase des Blutes dienen folgende Methoden (s. Müller: Biolog. Gasanalyse in Abderhaldens Handbuch III 2, S. 555): 1. die Blutgaspumpe. Das mit ausgekochtem Wasser verdünnte Blut wird in einem Rezipienten unter möglichst hohem Vakuum seiner Gase entbunden. Um dies leichter erreichen zu können, wird der Rezipient im Wasserbade erwärmt. Ein Uebertritt des gleichzeitig entbundenen Wasserdampfes wird durch Einschaltung eines kräftigen Kühlers und einer Schwefelsäurevorlage verhindert. Durch wiederholtes Erneuern des Vakuums werden die Gase quantitativ gewonnen und können dann gesammelt und analysiert werden. Moderne Blutgaspumpen arbeiten ohne Hähne, bei manchen wird auch das Evakuieren, das früher durch Heben und Senken eines Quecksilbergefäßes geschah, automatisch durch Wasserkraft bewirkt. 2. Einfacher und ebenso sicher zum Ziele führt die chemische Methode der Blutgasanalyse (Haldane, Barcroft, Müller), welche die Pumpenmethode in neuerer Zeit fast vollkommen verdrängt hat. Der Vorteil der Methode liegt außer ihrer Bequemlichkeit darin, daß Blutmengen bis zu 0,1 ccm (Barcroft) zur Analyse genügen. Bei diesem Verfahren wird das Blut mit NH_3 oder Saponin lackfarbig gemacht, mit Ferricyanidlösung versetzt und so der Sauerstoff entbunden. Die Volumänderung wird mit Hilfe eines Vergleichsvolumens (Differentialmanometer) bestimmt. Nach der O_2-Bestimmung erfolgt jene der CO_2 durch Austreiben derselben mittels 20% Weinsäurelösung und zwar ebenfalls mit Hilfe der Volumsänderung. Die Gasspannung im Blute wird mit Hilfe der Aerotonometer (Pflüger, Bohr, Krogh) bestimmt und zwar im strömenden Blute oder in Blutproben (Loewy). Das Prinzip ist in allen Fällen dies, daß das Blut bis zum Spannungsausgleich mit einer Gasmenge möglichst innig in Beziehung gebracht wird, worauf man die Höhe der Teildrucke in diesem Gase ermittelt. Beim Mikrotonometer von Krogh ist die Gasmenge auf ein möglichst geringes Volum (eine Gasblase) reduziert, so daß der Spannungsausgleich sehr rasch und vollkommen erfolgt.

1b) Chemische und physikalische Bindung der Gase im Blut. Die Gase finden sich im Blute zum Teil in physikalischer Bindung (gleichbedeutend mit Absorption), also gelöst, zum Teil in Form einer leicht dissoziablen chemischen Bindung. Unter Absorption oder physikalischer Bindung versteht man die Aufnahme von Gas in eine Flüssigkeit, die ein Lösungsvermögen für das betreffende Gas besitzt. Schüttelt man Wasser bei 0° und 760 m Druck mit reinem Sauerstoff, so vermag dieses pro 1 ccm 0,049 ccm O_2 (bei 38° nur 0,023 ccm) aufzunehmen. Dieser Wert wird als Absorptionskoeffizient bezeichnet, seine Höhe ändert sich, wie ersichtlich, mit der Temperatur aber auch mit der Art der Flüssigkeit, und deren Salzgehalt sowie mit der Natur des Gases, das absorbiert werden soll. Nach dem Henryschen Gesetz ist die Gasmenge, welche zur Absorption gelangt, proportional der Dichte, (dem Teildrucke) des Gases, das mit der Flüssigkeit in Kontakt steht. Sind mehrere Gase in einem Gasgemisch vorhanden und eine vollkommene Absättigung der Flüssigkeit mit der Gasmenge erfolgt, so entsprechen die zur Absorption gelangten Mengen jedes einzelnen Gases (unabhängig voneinander) genau dem Absorptionskoeffizienten und dem Teildrucke des betreffenden Gases im Gemenge. Die Größe der Absorption eines Gases wird durch das Vorhandensein anderer Gase nicht beeinflußt. Bei Absättigung einer Flüssigkeit mit einem Gasgemenge ist demnach die Summe

der Spannungen der Gase in der Flüssigkeit gleich der Summe der Spannungen im Gasgemenge. Der Spannungsausgleich vollzieht sich um so rascher je inniger der Kontakt zwischen Gas und Flüssigkeit ist. Hierauf beruht die Konstruktion der Tonometer, in denen durch Vergrößerung der Oberfläche eventuell durch Schütteln der Flüssigkeit mit dem Gas der Gasausgleich möglichst beschleunigt wird.

Die chemische Bindung von Gasen im Blute erkennt man daran, daß jene Menge Gas, die man durch Auspumpen aus dem Blute erhält, viel größer ist als jene, die man nach der Berechnung erhalten müßte, wenn das Blut nur auf Grund physikalischer Bindung bei gegebener Höhe der Temperatur und des Druckes mit den Gasen in Spannungsausgleich getreten wäre. Die Analyse ergibt, daß Sauerstoff und Kohlensäure zum weitaus größeren Teil in chemischer Bindung im Blute festgehalten sind. Die chemische Bindung von CO_2 und O_2 im Blute ist nur eine lockere, weil es möglich ist, diese durch Verminderung des Teildruckes des betreffenden Gases über dem Blute bis auf 0, vollkommen zu trennen (Dissoziation). Eine solche vollständige Trennung kann nicht nur durch die Wirkung eines Vakuums erzielt werden, sondern es tritt auch dann vollkommene Dissoziation der O_2 oder CO_2-Verbindungen des Blutes ein, wenn dieses z. B. mit stets neuen Mengen von reinem N_2 oder H_2 geschüttelt wird.

1c) Der Gehalt des Blutes an den einzelnen Gasen: Stickstoff und Argon finden sich nach der Annahme der meisten Autoren im Blute nur absorbiert, die Mengen werden mit 1,2 Vol. % N_2 (0,04 Vol.-% Argon) angegeben. Der Absorptionskoeffizient für N_2 ist bei 38° für Wasser und Blutplasma 0,012, für das Gesamtblut 0,011. Nach Bohr (1897) soll ein sehr geringer Teil des Stickstoffes in chemischer Bindung im Blute vorhanden sein (etwa 0,06 Vol.%) doch steht die Bestätigung dieses Befundes noch aus.

Der Sauerstoff ist im Plasma und in den Blutkörperchen absorbiert und außerdem an das Hämoglobin des Blutes chemisch gebunden. Der Absorptionskoeffizient beträgt für das Wasser bei 38° 0,0237, für das Plasma 0,023 und für das Gesamtblut 0,022. Das Plus an Sauerstoffes, das man durch Auspumpen aus dem Blute erhält, entstammt der chemischen Verbindung des Hämoglobins mit dem Sauerstoff, dem Oxyhämoglobin. Dieses Plus ist jedoch je nach den Umständen sehr verschieden groß. Die Annahme, daß das Sauerstoffbindungsvermögen der Hämoglobine bei Absättigung unter gleich hohem Sauerstoffdrucke ein konstantes sei, hat sich nicht bestätigt, ebensowenig kann heute noch daran festgehalten werden, daß pro Gramm Eisen vom Blute (dem Hämoglobin) eine konstante Menge von Sauerstoff gebunden werde (Hüfner, Bohr 1904). Es zeigt sich im Gegenteil, daß die Hämoglobine verschiedener Tiere sich in bezug auf ihr spezifisches Sauerstoffbindungsvermögen verschieden verhalten, ja Bohr (1892) nahm sogar an, daß das menschliche Hämoglobin kein einheitlicher Körper sei, sondern aus verschiedenen Hämoglobinen mit unterschiedlichem spezifischen Sauerstoffbindungsvermögen bestehe. Die Untersuchungen über den Einfluß verschiedener Sauerstoffdrucke auf die Sauerstoffmengen, die vom Hämoglobin gebunden werden, haben ergeben, daß das Hämoglobin bei allen Sauerstoffspannungen, die über rund 80 mm Hg liegen, nahezu vollkommen mit Sauerstoff gesättigt ist. Bei Verminderung der Sauerstoffdrucke unter den genannten Wert sinkt die Sauerstoffsättigung anfänglich langsam, dann aber rasch ab. Trägt man die Werte der prozentischen Sättigung als Ordinaten, die Sauerstoffdrucke als Abszissenwerte auf, erhält man eine Kurve, die man als Dissoziationsspannungskurve des Oxyhämoglobins bezeichnet (Fig. 1). Der Verlauf der Dissoziationsspannungskurve hängt nicht nur ab von der Tierart, von der das Blut entnommen wurde,

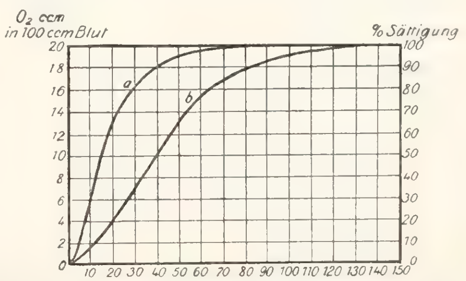


Fig. 1. Dissoziationsspannungskurve des Oxyhämoglobins. a CO_2-freies Blut; b bei 80 mm CO_2-Spannung. Nach Krogh kombiniert.

sondern er ist auch ein wesentlich abweichender bei Verwendung reiner Hämoglobinlösungen. Will man die Dissoziationsspannung des Hämoglobins im strömenden Blute beurteilen, so hat man zu berücksichtigen, daß der CO_2-Gehalt des Blutes die Sättigung des Hämoglobins mit Sauerstoff wesentlich beeinflußt (Bohr, Hasselbalch und Krogh 1904). Die Sauerstoffspannungskurve des Blutes fällt nämlich um so rascher ab, je größer der CO_2-Gehalt desselben ist (Fig. 1). Erhöhte Kohlensäurespannung in den Lungen führt aus diesem Grunde dazu, daß das Blut trotz gleichbleibender Sauerstoffspannung in den Alveolen sauerstoffärmer in den arteriellen Kreislauf eintritt, es ist aber auch zu bedenken, daß die hohe Kohlensäurespannung in den Geweben eine gesteigerte Dissoziation des

Oxyhämoglobins bedingt; sie vermag also infolge der Entbindung größerer Sauerstoffmengen zu leichterer Deckung des Bedarfes zu führen. Auf den Verlauf der Spannungskurve wirkt ferner die Temperatur. Das Bindungsvermögen des Hämoglobins für Sauerstoff nimmt mit zunehmender Temperatur ab. Nach Barcroft kann aus diesem Verhalten gefolgert werden, daß bei poikilothermen Tieren, die bei niedriger Temperatur leben und deren Hämoglobin also weniger leicht dissoziiert, der Sauerstoff hauptsächlich unter dem Einflusse der höheren CO_2-Spannung im Gewebe abgespalten wird. Bei höheren Tieren spielt die Entbindung des Sauerstoffs unter dem Einflusse gesteigerter Temperatur eine Rolle im Fieber und bei angestrengter Muskelarbeit (Barcroft 1909, Loewy, Caspari 1910); es wird durch die gesteigerte Dissoziation die Sauerstoffversorgung begünstigt. Die Konzentration des Blutes und dessen Salzgehalt, die Menge von sauren Abbauprodukten, insbesondere das Vorhandensein von Milchsäure (Barcroft 1910) beeinflussen ebenfalls den Verlauf der Sauerstoffspannungskurve in bedeutendem Maße. Im Höhenklima findet unter verringerter Blutalkalinität eine Steigerung der Dissoziation des Oxyhämoglobins statt, wodurch günstigere Verhältnisse für die Sauerstoffversorgung der Gewebe geschaffen werden (Barcroft 1911).

Kohlenoxydgas hat eine 154 mal größere Affinität zum Hämoglobin als Sauerstoff und verdrängt diesen daher aus dem Oxyhämoglobin. Statt jedes Moleküles O_2 tritt ein Molekül CO ein, es genügen 0,3 Vol.-% CO in der Inspirationsluft bei gewöhnlichem Sauerstoffgehalt der Luft, um $^3/_4$ des Oxyhämoglobins in CO-Hämoglobin überzuführen und dadurch Erstickung zu bewirken. Bei hohem Sauerstoffgehalt in den Alveolen (Sauerstoffatmung) werden 0,3% CO noch ohne Schaden vertragen.

Die Kohlensäure ist im Blute ebenfalls durch Absorption und chemische Bindung festgehalten. Der Absorptionskoeffizient ist für Wasser bei 38° 0,555, für das Plasma 0,541, für das Gesamtblut 0,511. Wegen des hohen Absorptionskoeffizienten und der beträchtlichen CO_2-Spannung im Gewebe werden beträchtliche Mengen von CO_2 durch Absorption auch in der Gewebsflüssigkeit festgehalten.

Die chemische Bindung der CO_2 im Blut ist sehr kompliziert und auch heute noch nicht völlig geklärt, zum größeren Teile ist die Kohlensäure locker, zum geringeren fest (an Alkali als Karbonat) gebunden. In den Blutkörperchen selbst findet sich etwa $^1/_3$ der gesamten CO_2 des Blutes. Mit großen Schwierigkeiten ist die Bestimmung der Spannungskurve der CO_2 im Blute verbunden, da die Alkaleszenz des Blutes je nach der Entnahme und Behandlung des Blutes Schwankungen unterworfen ist. Noch schwieriger ist es, die Bindungsweise der CO_2 an die Einzelbestandteile des Blutes zu erforschen. Es ergibt sich, daß der Verlauf der Spannungskurve der CO_2 in Blut und Blutserum aber auch in Hämoglobinlösungen ein sehr verschiedener ist. Im Serum ist die Dissoziation eine schwächere als im Gesamtblut. Im Vakuum gibt Blut trotz seiner alkalischen Reaktion seine ganze CO_2 ab, ja es kann durch Blut sogar CO_2 aus einer Sodalösung frei gemacht werden (Pflüger); aus dem Plasma entweicht beim Auspumpen der bei weitem größte Teil der Kohlensäure, der Rest kann jedoch erst nach Säurezusatz gewonnen werden. Es folgt daraus, daß im Gesamtblute saure (subazide) Stoffe (Jaquet) in größerer Menge enthalten sein müssen als im Serum, die ebenso wie Säuren auf den Austritt von CO_2 aus kohlensaurem Alkali wirken. Für die Erklärung dieser Erscheinung wurde angenommen, daß die Eiweißkörper des Blutes und das Hämoglobin als schwache Säuren wirken, die Alkali an sich gekettet halten, solange sie die stärker wirksame Säure vorstellen. Bei hoher CO_2-Konzentration überwiegt nach dieser Annahme jedoch die Säurewirkung der CO_2 (Massenwirkungsgesetz), sie spaltet die Alkali-Eiweißverbindung und es erfolgt die Absättigung der Säurevalenzen der CO_2 zum Teil durch das Alkali, zum Teil durch das Eiweiß, das sich (als amphoterer Körper gedacht), der CO_2 gegenüber nun ebenfalls als Alkali verhält. Der Beweis für die Spaltung der Alkalieiweißverbindungen durch hohe CO_2-Spannung sowie für das Entstehen von CO_2-Eiweißverbindungen wurde experimentell erbracht (Loewy und Zuntz, Setschenow; später Gürber, Hamburger). Es wurde jedoch gefunden, daß zur Spaltung der Eiweißalkaliverbindungen so hohe CO_2-Spannungen erforderlich sind, wie sie im Tierkörper wenigstens normaler Weise nicht vorkommen. Es kann also dieser Vorgang keine wesentliche Bedeutung für den Gasaustausch haben. Ebensowenig ist zu erwarten, daß bei den vorkommenden Drucken, CO_2 aus Bikarbonatverbindungen dissoziiert werde. Es ist demnach anzunehmen, daß die Schwankungen im Kohlensäuregehalt des Blutes nur auf Aenderungen in der Menge der CO_2 zurückzuführen sind, welche im Blute absorbiert ist und welche an Eiweiß oder Hämoglobin gebunden ist. Die Bindung der CO_2 an das Hämoglobin wird von der Sauerstoffspannung nur wenig beeinflußt, es muß daher die CO_2 an einen anderen Teil des Hämoglobins gebunden sein als der O_2. Es ist an-

zunehmen, daß der O_2 sich an den Chromoteil des Hämoglobins kettet (Bohr), während die CO_2 an das Globin tritt.

ɪd) Der Austausch der Gase zwischen Blutkörperchen und Plasma. Das Gasbindungsvermögen des Gesamtblutes und die Dissoziationsspannung ist abhängig vom Verhalten der Gase in Blutkörperchen und Plasma. Es muß immer wieder ein Gleichgewicht in der CO_2- und O_2-Spannung zwischen beiden eintreten. Wird dem Plasma Sauerstoff entzogen, so strömt aus dem Hämoglobin O_2 in das Plasma nach, wenn der Sauerstoffdruck in diesem so weit gesunken ist, daß das Oxyhämoglobin (OHb) weiter dissoziieren muß. Hohe Sauerstoffdrucke in der Lunge (Atmung reinen Sauerstoffes) führen durch Absorption zum Ansteigen des Sauerstoffgehaltes des Plasmas, das Hämoglobin vermag jedoch über seine Sättigung weiteren Sauerstoff nicht mehr aufzunehmen (ein Rest Hb muß sogar immer dissoziiert bleiben). Vermindert sich nach derart erhöhter Sauerstoffzufuhr der O_2-Druck über dem Blute, so wird insolange O_2 aus dem Plasma nahezu allein abströmen bis der O_2-Druck in diesem auf ca. 100 mm abgesunken ist, dann erst treten beträchtlichere Mengen von O_2 aus dem Hämoglobin an das Plasma über, größere Mengen werden aber erst bei weiterem Sinken des O_2-Druckes aus dem OHb dissoziieren. Begreiflicherweise muß nach dem Verlauf der Dissoziationskurve des OHb bei niederen Drucken der O_2-Verlust des Hämoglobins ein viel größerer sein. Diese Verhältnisse spielen eine Rolle bei der Sauerstofftherapie. Da auch die CO_2-Spannungskurve für das Plasma und die Blutkörperchen eine verschiedene ist, muß bei einer Aenderung im CO_2-Druck über dem Blute ein Austausch von CO_2 zwischen Blut und Plasma stattfinden, dies ist umsomehr der Fall, als durch das Wandern von Verbindungen aus dem Plasma in die Blutkörperchen und umgekehrt die Bindungsverhältnisse für die CO_2 ständig verschoben werden. Durch Zuntz, Hamburger u. a. wurde nämlich nachgewiesen, daß das Plasma des CO_2 reichen Blutes stets reicher an Alkalien, aber ärmer an Chlor (Koeppe) gefunden wird, als das arterielle.

Die Menge und Spannung der Blutgase. Der Sauerstoffgehalt des menschlichen arteriellen Blutes beträgt nach Setschenow 21,6 Vol.-%, hiervon sind rund 0,5% durch Absorption festgehalten. Nach den Versuchen von A. Loewy sind im Menschenblut 19 Vol.-% O_2 im Mittel enthalten. Für den kräftig genährten Hund schwanken die Werte zwischen 18 und 22 Vol.-% (Pflüger, Bohr). Niedriger liegt der O_2-Gehalt im arteriellen Blute der Pflanzenfresser und Vögel (Pferd 14%; Hammel 10%; Kaninchen 13%; Taube 10,7%; Ente 14,9%). An Kohlensäure wurden gefunden beim Menschen 40 Vol.-% (Hund 33 bis 34; Pferd 49; Hammel 45; Kaninchen 35; Huhn 47 Vol.-%). Die angeführten Werte stellen jedoch keineswegs Standardzahlen vor, denn die Schwankungen im CO_2 und O_2-Gehalt des arteriellen Blutes ein und desselben Tieres sind außerordentlich groß (vgl. Zuntz, Hermanns Handb. IV/2, S. 35).

Von Stickstoff und Argon enthält das Blut, wie erwähnt, 1,2 Volumprozente. Kohlenoxyd findet sich auch im Blute normaler Menschen in geringen Spuren. Die Herkunft ist nicht sichergestellt (Nicloux 1901, Lepine und Boulud 1906). Ozon ist im frischen Blut nicht nachzuweisen (Pflüger), zersetztes Blut gibt charakteristische Ozonreaktion.

Das venöse Blut enthält weniger Sauerstoff und mehr CO_2 als das arterielle. Untersucht man das venöse Blut aus dem rechten Herzen, so erhält man die besten Durchschnittsproben, desungeachtet weichen aber doch die Angaben über den Gasgehalt ebenso wie beim arteriellen Blut sehr stark voneinander ab. Von A. Loewy und v. Schrötter (1905) wurden auf Grund von Lungenkatheterversuchen 12 bis 15,5 Vol.-% O_2 gefunden. Der Gasgehalt des venösen Blutes des abgenabelten Kindes an CO_2 beträgt nach Cohnstein und Zuntz (1884) 40,5 bis 47 Vol.-%. Die Werte (Näherungswerte) für den Gasgehalt des venösen Blutes bei Tieren lauten in Vol.-%: Hund O_2 13, CO_2 47,2; Pferd 7,6 O_2, 55,9 CO_2; Schaf 6,5 O_2, 48,3 CO_2; Hammel 5,4 O_2, 55,5 CO_2; Huhn 4,1 O_2, 57,5 CO_2. Sehr verschieden ist bei Tieren und Menschen der Gasgehalt des Venenblutes, das aus den einzelnen Organen ausfließt. Man kann im allgemeinen annehmen, daß das venöse Blut des Menschen rund 8% O_2 ärmer und 6 Vol.-% CO_2 reicher ist als das arterielle. Daraus ergibt sich der „respiratorische Quotient" des Blutes mit 0,75. Es ist jedoch begreiflich, daß diesem Werte darum nur eine geringe Bedeutung beizulegen ist, weil die Unterschiede in den Ergebnissen der Blutgasanalysen recht beträchtliche sind. Bedeutende Abweichungen finden sich schon, wenn man das Blut von ein und demselben Tiere unter möglichst gleichen Bedingungen untersucht; besonders groß sind sie, wie erwähnt, beim venösen Blut. Aber auch durch die Methodik können künstlich wesentliche Differenzen erzeugt werden, denn die Werte schwanken schon dann sehr stark (um 10%), wenn das Auspumpen verschieden schnell und durch ein trockenes oder feuchtes Vakuum erfolgt. Daran ist zu einem guten Teile die Eigenschaft des Blutes schuld, nach Entnahme aus der Ader

Sauerstoff in festerer Form an sich zu binden. Verschließt man nämlich verdünntes Blut, das deutlich die Streifen des Oxyhämoglobins zeigt, in einem Fläschchen, so beobachtet man, daß nach einiger Zeit die Streifen des Oxyhämoglobins verschwinden und jene des reduzierten Hämoglobins auftreten, man sieht also, daß das Blut sich selbst reduziert hat. Auch dann, wenn man Erstickungsblut mit O_2 versetzt, gelingt es nicht mehr den verschwundenen Sauerstoff durch Auspumpen quantitativ aus dem Blut wieder zu erhalten. Die Ursache für diese Erscheinung liegt nach der derzeitigen Anschauung in einer Bindung des O_2 an die Blutkörperchen, insbesondere die Leukozyten, möglicherweise handelt es sich aber auch um einen Stoffwechsel der Blutkörperchen als lebendes Gewebe. Ein solcher wurde besonders bei jugendlichen roten Blutkörperchen von Warburg und von Morawitz (1909) tatsächlich nachgewiesen.

Es ist schließlich auch selbstverständlich, daß die Unterschiede im Zellstoffwechsel, wie auch alle jene Einflüsse, die den Gasgehalt des Blutes vorübergehend zu verändern vermögen, den respiratorischen Quotienten des Blutes beeinflussen müssen:

1e) Einflüsse auf den Gasgehalt des Gesamtblutes. Der Gasgehalt des Blutes wird hauptsächlich durch folgende Umstände beeinflußt: 1. Durch die Menge des Hämoglobins und die Art des Hämoglobins; 2. durch die Höhe des Kohlensäuregehaltes, der auch auf die Sauerstoffsättigung rückwirkt; 3. durch Unterschiede in der Höhe der Blutalkalinität und das Auftreten saurer Oxydationszwischenstufen; 4. durch die Temperatur; 5. durch die Höhe der Teildrucke der Gase in der Lunge bezw. in den Geweben (nach Pflüger und Filehne wechselt der Blutgasgehalt sogar mit jeder In- und Exspiration); 6. durch die Größe und Art der Lungenventilation sowie durch die Entfaltung der Lunge, abgesehen von dem Teildruck der Gase in der Lunge. Wenn nämlich bei flacher Ventilation Blut durch Lungenpartieen zirkuliert, die nicht oder nur wenig ventiliert worden sind, so wird dem vollarterialisierten Blut weniger oder nicht arterialisiertes zugemischt; 7. durch die Tätigkeit der Organe, doch ist diese Wirkung keineswegs eine einheitliche. Meist steigt bei der Arbeit der O_2-Gehalt des arteriellen Blutes und sinkt dessen CO_2-Gehalt, während im venösen Blut der CO_2-Gehalt erhöht, der O_2-Gehalt gegenüber der Ruhe vermindert ist. Aus der tätigen Speicheldrüse strömt das Blut jedoch sauerstoffreicher aus als aus der ruhenden. Dies kann darauf beruhen, daß das Blut bei dem raschen Passieren durch die erweiterten Gefäße relativ weniger Sauerstoff verliert und ferner infolge des beträchtlichen Wasserverlustes an Hämoglobin prozentuell reicher wird (Nerveneinfluß?); 8. durch die Stauung. Diese führt zur Verminderung des Sauerstoffgehaltes und Steigerung des CO_2-Gehaltes; 9. möglicherweise durch die Sekretion von Sauerstoff und Kohlensäure durch das Lungengewebe. Die Annahme einer solchen wird zur Zeit von den meisten Autoren bestritten.

1f) Die Gasspannungen im Blute. Wird das Blut mit einem Gas geschüttelt und vermag es sich mit diesem in Ausgleich zu setzen, so sind die Gasspannungen im Blute dieselben wie in jenem Gase, mit dem es in Ausgleich getreten ist. Die meisten älteren Untersuchungen haben wesentlich voneinander abweichende Werte für die Gasspannungen der Lungenluft und jene der Blutgase im Körper ergeben; doch läßt sich dies dadurch erklären, daß bei den früher verwendeten Instrumenten ein Spannungsausgleich nicht zustande gekommen sein dürfte. Die Rückschlüsse auf die Gasspannung im Venenblut, welche sich auf der Anwendung des Lungenkatheters und auf der Analyse der entnommenen Luftproben aufbauen, sind ebenfalls kaum als vollkommen eindeutig zu betrachten. Einwände können auch gegen die indirekte Methode der Bestimmungen der Sauerstoffspannung im Blute, die auf der Einatmung CO-haltiger Luft basieren, erhoben werden. In neuester Zeit hat Krogh durch sein Mikrotonometer (1908) einen Apparat geschaffen, der allen Anforderungen voll zu entsprechen scheint und insbesondere einen sehr raschen und vollkommenen Spannungsausgleich zwischen dem Blut und dem zu untersuchenden Gasbläschen herbeiführt. A. Krogh und M. Krogh fanden, daß die Gasspannungen im Arterienblute jenen des Lungengases entsprechen und von diesem nur um einen geringen Betrag, dem erforderlichen Spannungsgefälle entsprechend, abweichen. Zufuhr von CO_2 in die Lunge hatte in den Versuchen Kroghs einen ganz übereinstimmenden Anstieg der CO_2-Tension des Carotis-Blutes zur Folge. Weiteres s. unter 2 S. 695.

Gasbindende Stoffe im Blute niederer Tiere. Das Hämoglobin tritt nur bei manchen der niederen Tiere auf, an dessen Stelle findet man bei anderen Tierformen blaue, grüne oder gelbliche Farbstoffe, die mit dem Gaswechsel in Verbindung zu bringen sind. Auch farblose, sauerstoffbindende eiweißhaltige Körper, die für die Unterhaltung der Atmung von Bedeutung sind, dürften im Tierreich ziemlich verbreitet sein, ohne daß sie jedoch näher gekannt wären (Achrooglobuline); solche Stoffe finden sich bei manchen Muscheln und Schnecken, zum Teile liegen sie nicht in Blutzellen.

sondern sind diffus in der Blut- oder Gewebsflüssigkeit verteilt. Untersuchungen über das Sauerstoffbindungsvermögen von Chromoproteiden verdanken wir u. a. in neuester Zeit Winterstein (1909).

Von den Farbstoffen seien erwähnt das Hämocyanin, eine blaugefärbte Eiweißkupferverbindung, die im Vakuum dissoziiert und die blaue Farbe verliert. Hämocyanin findet sich bei höheren Krebsen, Cephalopoden, Skorpionen, manchen Spinnen u. a. Bei Oktopus beträgt das O_2-Bindungsvermögen des luftgesättigten, hämocyaninhaltigen Blutes 4,2—5 Vol.-%, bei Palaemon 1,5%, bei Maja 1,7%. Ein rötlich gefärbter Farbstoff ist das Echinochrom der Seeigel, rötlich ist das Hämerythrin bei Sipunculus, das in der Leibeshöhlenflüssigkeit 2 Vol.-% O_2 bindet, wenn diese mit Luft gesättigt wird. Ob das Chlorocruorin der Borstenwürmer Sauerstoff zu binden vermag, ist derzeit nicht entschieden. Chlorophyll wurde durch Engelmann bei Vorticellen nachgewiesen und gezeigt, daß dies im Licht Sauerstoffabgabe herbeiführt (Bakterienmethode im Mikrospektrum), nach neueren Auffassungen handelt es sich hierbei jedoch nur um Chlorophyll symbiotisch lebender Algen.

2. Die alveolare Tension und der Gasaustausch zwischen Blut und Lungenluft. Sekretionstheorie. Da die Sättigung des Blutes mit Gasen abhängig ist von dem Teildrucke der Gase, mit denen es in Berührung kommt, so müssen im lebenden Tiere die Gasspannungen in den Lungenalveolen von größtem Einfluß auf die Gasspannungen im Blute sein. Ob dieser Einfluß aber ausschließlich in Betracht kommt, läßt sich von vornherein nicht sagen, da das Blut nicht unmittelbar, wie im Aerotonometer in Spannungsausgleich mit der Alveolenluft tritt. Zwischen Blut und Lungenluft sind als trennende Membranen die Wandungen der Alveolen und jene der Blutkapillaren eingeschaltet, die von den Gasen durchsetzt werden müssen. Bei der Beurteilung der Bedingungen für den Gasaustausch darf die Zusammensetzung der Luft, welche mit der Exspiration entleert wird, nicht schlechtweg als identisch mit jener der Alveolenluft angesehen werden, denn sie ist CO_2-ärmer und O_2-reicher als die Luft der Alveolen, weil letzterer bei der Ausatmung auch jenes Gas zugemischt ist, das sich in den Bronchien in der Luftröhre und im Nasenrachenraum befand. Die Zusammensetzung dieses Gasanteiles nähert sich sehr stark jener der atmosphärischen Luft, weil dieses Gas nicht am Lungengaswechsel in den Alveolen beteiligt ist. Es ist ferner selbstverständlich, daß die Gasspannung in den Alveolen eine ständig wechselnde sein muß. Die Sauerstoffspannung liegt am höchsten am Schlusse der Inspiration, am tiefsten am Schlusse der Exspiration. Wenn man daher von alveolärer Spannung spricht, kann unter dieser nur die mittlere Spannung in den Alveolen gemeint sein. Die Höhe der Gasspannungen in den Lungen kann für bestimmte Verhältnisse direkt durch den Lungenkatheter (Pflüger) ermittelt werden. Die Handhabung des Instruments beruht darauf, daß man trachtet, eine feine Sonde, deren Ende mit einem aufblasbaren Ballon armiert ist, in einen Bronchus einzuführen. Durch den Ballon kann der Bronchus abgeschlossen werden und mittels der Sonde werden Gasproben aus dem abgesperrten Bezirk entnommen. Auf indirektem Wege ist die Alveolentension zu berechnen (Loewy, Zuntz) dadurch, daß man, unter Annahme eines konstanten Wertes für den schädlichen Raum, 140 ccm Gas, von der Zusammensetzung atmosphärischer Luft abzieht von derjenigen Menge von Gas, die bei einem einzelnen Atemzug ausgeatmet worden ist. Die Restmenge des Gases und der in dieser erübrigende Gehalt an CO_2 und O_2 gestattet, den Prozentgehalt der Alveolenluft an CO_2 und O_2 zu berechnen. Die Höhe der Teildrucke der CO_2 und O_2 ergeben sich dann, wenn man zuerst vom Gesamtdruck des Gases (korrigierter Barometerstand) den Teildruck abzieht, der auf den Wasserdampf im Gemenge entfällt. Da die Luft in der Lunge bei rund 37° C mit Wasserdampf gesättigt ist, ist dies ein konstanter Wert (46,6 mm Hg). Der Rest stellt die Summe der Teildrucke von CO_2, O_2 und N_2 vor und in dieser Summe verhält sich der Teildruck jedes einzelnen dieser drei Gase proportional dem Gehalte des Gemenges an diesem Gase (bei 4% CO_2-Gehalt, also vier Prozenten des restlichen Gesamtdruckes). Ein anderes Verfahren wurde von Haldane angegeben. Es beruht darauf, daß eine Gasprobe, die dem Beginne und dem Ende einer Exspiration entspricht, von der Lungenluft entnommen wird. Das Mittel aus den Werten der analytisch bestimmten Zusammensetzung dient der Berechnung der mittleren Alveolartension. Als Werte für die alveoläre Sauerstoff- und Kohlensäurespannung wurden gefunden in der Ebene im Mittel 105 mm Hg Sauerstoffdruck und 35 mm Hg Kohlensäuredruck. Der CO_2-Druck ist bei verschiedenen Personen keineswegs gleich hoch, er schwankt innerhalb der Werte von 32 bis 46 mm in einwandfreien Beobachtungen bei verschiedenen Menschen. Die Sauerstoffspannungen differieren bei den meisten Menschen nur wenig. Unter vermindertem Luftdruck nehmen die Werte für die Gasspannung des Sauerstoffes und die Kohlensäure allmählich ab, während der Teildruck des Wasserdampfes konstant bleibt und demnach

einen um so größeren Teil des Gesamtdruckes vorstellt, je verdünnter die Luft ist. Während der Arbeit ist die Verschiebung der Gasspannungen in der Lunge keine wesentliche, es wurde hierbei je nach der Atemmechanik Zunahme oder Abnahme der Gasspannungen in den Alveolen beobachtet. Unter erhöhtem Luftdruck steigen die Gasspannungen in der Lunge. Dies ist insbesondere wegen des Ansteigens der N_2-Spannung von Bedeutung. Der Druckzunahme entsprechend tritt unter erhöhtem Druck (Caissons) durch Absorption eine beträchtliche Menge von N_2 in die Gewebsflüssigkeit ein, welche bei zu rascher Verminderung des Druckes (zu schnellem Ausschleussen) in Form von Gasblasen entbunden wird. Hierauf beruhen die bei Caissonarbeitern beobachteten Erkrankungen und Todesfälle. Bei langsamer Druckverminderung (langsamem Ausschleusen) kann das Auftreten von Gasblasen (Luftembolie) vermieden werden, da dann die Zeit ausreicht, daß der überschüssige Stickstoff durch die Lunge abgegeben wird.

Die Höhe der Kohlensäurespannung, die für den einzelnen Menschen in der Ebene charakteristisch ist, wird von diesem mit großer Konstanz eingehalten. Unter vermindertem Luftdruck sieht man die Atemmechanik sich immer so verändern, daß ein konstanter Wert für die Sauerstoffspannung erzielt wird, der für die einzelne Versuchsperson unter sonst gleichen Verhältnissen so charakteristisch ist, daß man danach die Meereshöhe bestimmen könnte (Haldane und Boykott, Durig 1905, 1910). Vertiefung der Atmung führt bei sonst gleich großer Ventilation zu einem Steigen der O_2-Spannung und einem Sinken der CO_2-Spannung, was sich aus den Verhältnissen der Zumischung der frischen Luft zur Rest- und Reserveluft und aus der Wirkung des schädlichen Raumes ergibt (A. Loewy). Bei erhöhtem Sauerstoffbedarf während der Arbeit oder bei vermindertem Sauerstoffanbot (im Höhenklima) könnten daher durch eine Anpassung der Atemmechanik im Sinne einer weiteren Vertiefung der Atemzüge günstigere Verhältnisse für die Sauerstoffversorgung durch Steigerung der alv. O_2-Spannung herbeigeführt werden. Eine solche Regulation konnte jedoch nicht nachgewiesen werden (Durig). Die pro Millimeter CO_2-Spannung in der Lunge geatmete Gasmenge (s. o.) steigt stetig, je größer die Höhe ist, in die ein Mensch vordringt.

Da das Gas in den Alveolen, insbesondere auf der Höhe der Inspiration einen höheren O_2-Druck und einen niederen CO_2-Druck aufweist, als das venöse Lungenblut, muß infolge dieser Druckdifferenz Sauerstoff an das venöse Blut übertreten und CO_2 in die Lungenluft abgegeben werden. Je größer die Druckdifferenzen sind, umso rascher muß sich der Gasaustausch vollziehen. Nach physikalischen Forderungen müßte dann, wenn die Zeit eine zureichende ist, der Gasübertritt bis zum Spannungsausgleich fortdauern, und es wäre die Menge der übertretenden Gase durch den Eintritt des Spannungsausgleiches begrenzt. Es ist jedoch zu berücksichtigen, daß die Lunge wie jedes andere Organ aus lebendem Gewebe besteht und darum ihren eigenen Stoffwechsel besitzt, also CO_2 produzieren und O_2 verbrauchen muß. Endlich ist zu bedenken, daß die Möglichkeit einzuräumen ist, daß das Lungengewebe ähnlich wie das Gewebe der Schwimmblase der Fische O_2 und CO_2 zu secernieren vermag. Unter dieser letzteren Voraussetzung könnten die übergetretenen Gasmengen nicht mehr dem Spannungsausgleich entsprechen. Ist der Spannungsausgleich in der Lunge ausschließlich auf Grund der Druckdifferenzen vollzogen, so müssen die Gasspannungen in den Alveolen immer noch um einen geringen Wert verschieden von jenen im Blute bleiben, da die Gasmoleküle unter Leistung von Arbeit die trennende Wand durchsetzen müssen. Das Ergebnis der Blutgasanalysen steht in guter Uebereinstimmung mit dieser Forderung. Es wurde nämlich in den neuen einwandfreien Tonometerversuchen, der CO_2-Druck in den Alveolen stets geringer, jener des O_2 stets höher gefunden als im arteriellen Blute (Krogh 1910).

Das Bestehen eines eigenen Stoffwechsels in der Lunge hat seine Bestätigung in den Versuchen von Bohr und Henriques (1897) gefunden. Die beiden Autoren maßen dem Lungenstoffwechsel eine sehr große Bedeutung bei. Dieser sollte nicht nur beim ruhenden Menschen in Betracht kommen, sondern beim arbeitenden zu einer solchen Höhe anwachsen, daß auf ihn unter Umständen sogar ein größerer Teil der Gesamtverbrennungsvorgänge entfallen würde, als auf die Oxydationsvorgänge im ganzen übrigen Gewebe. Im Durchschnitt sollte ein Drittel der Oxydationsvorgänge des Gesamtkörpers sich in der Lunge abspielen. Bohr und Henriques nahmen an, daß bei einem Mißverhältnis zwischen Sauerstoffverbrauch und Sauerstoffzufuhr in großer Menge Oxydationszwischenstufen in den Kreislauf eingeschwemmt würden, die in der Lunge zur vollkommenen Verbrennung gelangen. Zu bedenken ist hierbei jedoch, daß unter physiologischen Verhältnissen solche Stoffe wohl in größerer Menge im Harn niemals aber im Blut nachgewiesen wurden. Sich selbst überlassenes arterielles Blut reduziert nur sehr langsam und nur die Blutkörperchen im Blute asphyktischer Tiere binden reichlich und rasch O_2 an sich.

Die Versuche der beiden Autoren, die zur Annahme so weitgehender Oxydation solcher Zwischenprodukte in der Lunge führten, können also wohl nur für die Verhältnisse so verminderter Sauerstoffversorgung Geltung haben, wie sie eben in ihren Beobachtungen vorlagen. Es ist jedoch vollkommen sicher, daß dann, wenn infolge von Sauerstoffmangel reichlich intermediäre Produkte auftreten und solche durch den Kreislauf auch in die Lunge eingeschwemmt werden, diese Stoffe in der Lunge umso leichter zur Oxydation gelangen müssen, je höher in dieser die Sauerstoffspannung liegt. Beim Menschen spielt die Möglichkeit der Oxydation der Zwischenstufen in der Lunge jedenfalls eine wichtige Rolle, die bei der Sauerstofftherapie in Betracht kommt. Es ist begreiflich, daß die Sauerstoffinhalation nicht nur durch die Zufuhr größerer, im Plasma absorbierter Sauerstoffmengen, sondern auch durch das Fertigoxydieren intermediärer Produkte in der Lunge bei künstlich erhöhter Sauerstoffspannung günstig und für einige Zeit nachhaltend wirken muß.

Die Annahme einer Gassekretion in der Lunge (Bohr; Haldane) oder die Anschauung, daß durch die Wirkung des lebenden Lungengewebes die Spannungsdifferenz zwischen Blut und Lungenluft so erhöht werden könne, daß größere Mengen von Gas die Alveolenwände zu passieren vermögen, ist von den Anhängern der rein physikalischen Auffassung des Gasaustausches in der Lunge entschieden bestritten worden.

Für die Sekretionstheorie werden folgende Argumente ins Feld geführt. Es wurde durch Bohr gefunden, daß die CO_2-Spannung im arteriellen Blut niedriger, die O_2-Spannung höher sei als im Alveolengas. Die Schwimmblase der Fische enthält ein Gas von 80% O_2-Gehalt, es kann also durch lebendes Gewebe wirklich Sauerstoff sezerniert werden. Beim Frosch, ebenso bei Schildkröte und Kaninchen, können nervöse Einflüsse auf die Atmung und den Gasaustausch nachgewiesen werden (Henriquez; Maar 1902). Nach Bohr könnten ferner jene Mengen von Sauerstoff, die bei angestrengter Arbeit verbraucht werden (insbesondere im Höhenklima bei vermindertem Luft druck) die Alveolenwände auf Grund der bestehenden Druckdifferenzen (Invasionskoeffizienten) nicht passieren. Demgegenüber wurde durch Zuntz und Loewy im Experimente an der Froschlunge bewiesen, daß die Gase die Lungenepithelien vermöge des großen Lösungsvermögens desselben für Gase sogar leichter zu durchsetzen vermögen als Wasser. Es ergibt sich aus der Berechnung der Gesamtoberfläche der Alveolen und der Diffusionsgeschwindigkeit durch diese, daß bei Atmung atmosphärischer Luft mindestens 6 l O_2 pro Minute die Lunge zu passieren vermögen, so daß die selbst bei forzierter Arbeit erforderliche Sauerstoffmenge von 3 l leicht auf rein physikalischem Wege durch Druckausgleich gedeckt werden kann. Es genügt eine Spannungsdifferenz von 3 mm für den Sauerstoff beim arbeitenden und von 0,5 mm beim ruhenden Menschen sowie eine Spannungsdifferenz von 0.02 mm Hg an Kohlensäure, damit der Gasübertritt hinreichend rasch erfolgen kann (Loewy und Zuntz 1904). Ein Versagen der O_2-Zufuhr kann unter sonst normalen Verhältnissen nur durch ungenügende Bindung von O_2 durch das Hämoglobin bei wesentlich vermindertem Sauerstoffdruck der geatmeten Luft auf Grund der Dissoziationskurve eintreten. Im selben Sinne beweisen die Versuche von A. und M. Krogh (1910) direkt auf Grund der CO-Mengen, die aus der Lungenluft in der Zeiteinheit ins Blut übertreten können, daß unter allen (nicht pathologischen) Umständen der Sauerstoffbedarf durch Diffusion gedeckt werden könne. Ein Schluß, der unter der zulässigen Annahme einer Analogie zwischen dem Verhalten des CO-Gases und des O_2 hinsichtlich der Diffusion durch das hemmende Gewebe vollauf berechtigt ist. Gegen die Angabe von Bohr, daß in der Lungenluft höhere CO_2-Drucke als im arteriellen Blute gefunden werden, sind Einwände erhoben worden, die sich auf die veränderte Zirkulation bei den Versuchtstieren beziehen. Bohr selbst hat in letzter Zeit die Sekretionstheorie fallen gelassen und an deren Stelle die Annahme einer Steigerung der Spannungsdifferenzen zwischen Blutgasen und Lungenluft durch vitale Kräfte gesetzt. Man gelangt auf Grund dieser Annahme aber auch dann nicht zur Förderung hinreichender Sauerstoffmengen, wenn man annimmt, daß die Sauerstoffspannung im Blute bis auf 0 gedrückt werden könnte. Es zeigt sich nämlich, daß bei angestrengter Arbeit im Hochgebirge tatsächlich mehr Sauerstoff aus der Inspirationsluft verschwindet als bei der von Bohr angenommenen Diffusionsgeschwindigkeit und bei maximaler Steigerung der Druckdifferenz übertreten könnte (Durig 1910).

Mit Hilfe des Mikrotonometers haben nun, wie erwähnt, in jüngster Zeit A. und M. Krogh nachgewiesen, daß in allen Fällen die O_2-Spannungen des Lungenblutes niedriger, jene der CO_2 höher als die entsprechenden Spannungen in der Alveolenluft waren, es ergibt sich also daraus, daß das Druckgefälle immer im Sinne der tatsächlichen Strömung der Gase eingehalten wird, daß also kein Anhaltspunkt für die Hypothese der Gassekretions- oder Druckdifferenzsteigerung erübrigt. Wegen der Unterschiede im Diffusionskoeffizienten ist die Differenz zwischen der Sauerstoffspannung

im Blut und in den Alveolen ein größerer als jener der CO_2-Spannung. Krogh fand im arteriellen Lungenblut eine um 0,1% höhere CO_2-Spannung als in den Alveolen und eine um 1 bis 2% höhere O_2-Spannung in den Alveolen als im arteriellen Blut.

Gegen die Versuche von Haldane und Douglas, die auch im Sinne einer Gassekretion sprachen, sind ebenfalls Einwände erhoben worden. Aus den neuesten Beobachtungen dieser Autoren (1911) geht hervor, daß eine Gassekretion unter normalen Bedingungen in der Tat nicht stattfindet. Tritt jedoch Sauerstoffmangel ein, so soll dieser als Reiz auf das Lungengewebe wirken und dies zur Sauerstoffsekretion veranlassen, und zwar sei es das Epithel der Blutkapillaren, welches für die Gassekretion in Betracht kommen dürfte (zusammenfassend über die Frage bei Loewy Berl. kl. Wochenschr. 1910). Erwähnt sei ferner, daß der Vergleich zwischen Schwimmblase und Lunge darum nicht angängig ist weil in der Schwimmblase an einer Stelle ein eigenes, O_2 sezernierendes Organ (eine Drüse) ausgebildet ist. Die nervöse Beeinflussung des Gaswechsels beim Frosche kann vermutlich auf eine Wirkung der Nerven auf die Blutgefäße zurückgeführt werden.

3. **Die chemischen Veränderungen der geatmeten Luft. Atmen abnormaler Gasgemenge.** Zur Festlegung der Veränderungen dienen hauptsächlich die im folgenden angeführten Methoden. Die Gasmengen, die untersucht werden sollen, werden entweder volumetrisch oder mit Hilfe der Wägung, beziehungsweise titrimetrisch gemessen. Bei der volumetrischen Bestimmung muß die Gasmenge erst auf bestimmte Temperatur, bestimmten Druck und Trockenheit umgerechnet werden. In der Regel spricht man von reduziertem Volumen als jenem, das auf 0°, 760 mm Hg Druck und Trockenheit berechnet ist. Bei der Messung der Gase ist größtes Gewicht auf die Dichtigkeit der Verbindungen und auf Gleichmäßigkeit der Temperatur zu legen. Die Gase werden meist volumetrisch bei vollkommener Sättigung mit Wasserdampf gemessen wobei die Meßgefäße kalibriert sein müssen. Wird eine Flüssigkeit an Stelle von Hg zum Abschluß verwendet, ist die Möglichkeit einer Absorption von Gas in der Flüssigkeit zu bedenken. Wesentlich vereinfacht wird die Berechnung der Gasvolumina, wenn man das Verhalten bekannter Vergleichsvolumina heranzieht (Thermobarometer, Luftbarometer). Bei Analysen hat es sich besonders bewährt, das Vergleichsvolum zugleich mit dem zu untersuchenden Volum auf ein Differentialmanometer wirken zu lassen (z. B. bei der Mikrogasanalyse). Titrimetrisch können O_2 (im Wasser) und CO_2 bestimmt werden. Meist verfährt man in der Weise, daß man Gase durch feste chemische Bindung quantitativ aus dem Gasgemisch entfernt und dann die Volumverminderung des Gases oder die Gewichtsänderung ermittelt.

Die Respirationsapparate gestatten die Veränderungen des Gaswechsels während längerer Zeitperioden zu verfolgen; hierdurch wird es möglich eine Bilanz über die Gesamtheit der gasförmigen Einnahmen und Ausgaben aufzustellen.

1. Dies geschieht nach dem Prinzip von Pettenkofer in der Weise, daß die Versuchsperson (oder das Tier) in einen Kasten gebracht wird, durch den mittels Pumpwirkung Luft gesaugt wird. Das Volum der Luft, welche den Kasten verläßt, wird mit Hilfe einer Gasuhr bestimmt, aus dem Luftstrom wird ein proportionaler Anteil abgezweigt, gemessen und durch Schwefelsäure und Barytvorlagen geschickt, in denen der Gehalt an Wasser und an CO_2 bestimmt werden kann. Ein besonders großer Apparat dieser Type ist jener von Sonden und Tigerstedt; ein mit Zinkblech ausgeschlagenes Zimmer dient als Respirationskammer, durch einen Ventilator wird die Luft im Zimmer durchgemischt. Die Analyse des CO_2-Gehaltes der aus der Kammerluft entnommenen Luftproben geschieht volumetrisch nach Petterson. Der Apparat von Jaquet ist als kleine, eben für die Größe eines Menschen berechnete Kammer charakterisiert. Analyse ebenfalls nach Petterson auf CO_2 und O_2.

2. Das Prinzip von Regnault und Reiset beruht auf der Herstellung eines Kreisstromes. Das Versuchsindividuum atmet immer wieder dasselbe Gas, das aus der Kammer gepumpt, von CO_2 befreit und wieder in die Kammer zurückgeschickt wird. Der verbrauchte Sauerstoff wird durch Ersatz aus Vorratsflaschen gedeckt. Hierbei wird CO_2 und O_2-Verbrauch bestimmt. Auf diesem Prinzipe beruhen die Apparate von Hoppe-Seyler, Atwater und Benedict, Zuntz und Oppenheimer sowie ein neuer Apparat von Zuntz, der gestattet, nach diesem oder nach dem Pettenkoferschen Prinzipe zu arbeiten.

3. Die Atmung wird direkt am Versuchsindividuum bestimmt. Hierbei werden Tracheal-(Tampon) — Kanülen, Mundstücke, Nasenoliven (Benedict) oder Gesichtsmasken verwendet. Bei letzteren besteht immer große Gefahr von Undichtigkeit. In allen diesen Fällen wird ausschließlich die Lungenatmung untersucht. Zur Sonderung der In- und Exspirationsluft werden Ventile verwendet, die möglichst wenig Widerstand und schädlichen Raum bei verläßlich dichtem Schluß besitzen sollen. Am empfehlenswertesten sind u. a. Darmventile (nach Zuntz) mit befeuchteten Präservativmembranen oder Fischblasen überzogene, seitlich geschlitzte Röhren, die von einer zweiten, äußeren Röhre umschlossen werden. Das Lovénsche Ventil, das aus zwei, mit Goldschlägerhaut überspannten Trommeln besteht, zeichnet sich durch besonders geringen schädlichen Raum aus. Gute Dienste erweisen auch Schwalbenschwanzventile aus Kautschuk. Die meisten übrigen Ventile sind unzweckmäßig, weil sie unverläßlich im Schluß sind oder zu große Widerstände geben. Die Messung der Gase geschieht mit der Gasuhr, aus der proportional jedem Atemzug automatisch zur Analyse Luftproben entnommen und gesammelt werden (Geppert und Zuntz). Bei den Versuchen im Freien wird eine trans-

portable, trockene Gasuhr auf dem Rücken mitgetragen. Auch des Spirometers kann man sich zum Sammeln der Gase bedienen (Speck, Tissot); Douglas (1911) sammelt das Exspirationsgas in einem Sack, den die Versuchsperson auf dem Rücken trägt. Nach Schluß des Versuches wird das Gas gemessen und analysiert. Benedict verwendet einen Apparat für den Menschen, bei welchem die Versuchsperson durch Nasenoliven gegen einen Sack hin und her atmet. Die Luft wird durch einen Motor im Kreisstrom getrieben, wobei sie entkohlensäuert, entwässert, wieder angefeuchtet und mit Sauerstoff versetzt, zum Sack zurückgelangt. Die Analyse geschieht durch Wägung.

Für kleine Tiere werden der nach dem Pettenkoferschen Prinzip gebaute kleine Voitsche Apparat, der Apparat von Haldane, Weinland u. a. verwendet. Auch das Regnaultsche Verfahren wurde hierbei benutzt, ja, die ursprüngliche Versuchsanordnung von Regnault und Reiset war ausschließlich für kleine Tiere zu verwenden. Ein neuer, sehr expeditiver Apparat von Benedict und Homans (1911) beruht darauf, daß kleine Tiere in einer Kammer, deren Deckel mit H_2O-Verschluß aufgedichtet ist, atmen. Durch einen Motor wird die Luft im Kreisstrom bewegt. Das Gas der Kammer wird in Proben analysiert. Das Tier selbst steht auf einer Art Wage, deren Schwankungen nach außen übertragen Bewegungen des Tieres aufzeichnen. Krogh konstruierte einen Respirationsapparat mit Kreisstrom nach besonders originellen Ideen mit einem Gesamtfassungsraum von nur 360 ccm. Für das Studium des Gaswechsels der Fische wird die durch den geschlossenen Behälter getriebene Luft auf Menge, CO_2 und O_2-Gehalt untersucht. Zuntz konstruierte einen eigenen Respirationsapparat für Fische, der sehr exakte Werte liefert. Winterstein verwendete Kanülenatmung zum Studium der Fischatmung.

An niederen marinen Tieren arbeitete Vernon; er untersuchte den Gaswechsel der Tiere, die sich in einem abgeschlossenen Gasbehälter befanden, der in einem zweiten als Wasserbad dienenden Gefäß eingetaucht war, um Temperaturkonstanz zu erzielen. Analyse nach Petterson. Gegen das von Pütter verwendete Verfahren, die Atmung von Wassertieren zu untersuchen, bestehen Bedenken. Für die Untersuchung der Atmung kleinster Tiere dient das Mikrorespirometer (Thunberg, Winterstein). Von Godlewski (1896) und Stoklasa (1908) wurden Verfahren zur Untersuchung der Atmung von Bakterien angegeben (vgl. Tigerstedt Handb. der phys. Methodik u. Abderhalden, Handb. III. 2).

Die Veränderungen der ausgeatmeten Luft. Im folgenden ist hauptsächlich das Verhalten des Menschen herausgegriffen. Die Exspirationsluft ist mit Wasserdampf gesättigt, sauerstoffärmer und kohlensäurereicher als die eingeatmete Luft.

Die Wassermengen, die mit der Exspirationsluft dem Menschen entzogen werden, wechseln mit der Größe der Ventilation (Arbeit), der Temperatur und der Sättigung der eingeatmeten Luft mit Wasserdampf. Die Exspirationsluft enthält im Liter 43,95 mg Wasser. Als Mittel für die Wasserdampfausscheidung des Menschen durch die Lunge können 500 ccm pro Tag angenommen werden.

Der Stickstoffgehalt der Exspirationsluft liegt zwischen den Werten 79,20 und 80,20 Vol.-%, nur selten findet man höhere oder niederere Werte. Sämtlicher mit der Inspirationsluft eingeführter Stickstoff erscheint in der Exspirationsluft wieder und es ist als festgestellt zu erachten, daß gasförmiger Stickstoff sich an den chemischen Umsetzungen im Körper nicht beteiligt (Krogh, Oppenheimer).

Der Anteil, den der Wasserdampf im Gesamtvolum des Exspirationsgases einnimmt, ist um so größer, je niederer der Luftdruck ist, denn die Spannung des Wasserdampfes in der bei 37° mit H_2O-Dampf gesättigten Luft ist unabhängig vom Barometerstand. Durch die Erwärmung der eingeatmeten Luft und durch die Wasserverdunstung und endlich durch das Entweichen der CO_2 wird dem Körper Wärme entzogen (ca. 450 Kal.) woraus eine kühlende Wirkung der Lungen und Luftsäcke auf das Herz abgeleitet werden kann (Exner 1909). Es muß hierbei berücksichtigt werden, daß in der Lunge die Bindung des Sauerstoffs an das Hämoglobin unter positiver Wärmetönung einhergeht und hierfür pro Tag rund 300 Kal. anzusetzen sind, wodurch nahezu der gesamte Wärmeverlust von 450 Kal. gedeckt wird. Bezüglich dieses Wertes ist jedoch anzunehmen, daß die Hauptmenge der Wärme nicht in der Lunge, sondern schon in den oberen Luftwegen entzogen werden muß, da die Luft bereits in den mittelgroßen Bronchien mit H_2O-Dampf gesättigt und auf Körpertemperatur erwärmt sein dürfte (Kayser 1887).

Der Kohlensäuregehalt der Exspirationsluft kann beim Menschen im Mittel mit 4% angenommen werden. Je nach der Atemmechanik und der Erregbarkeit des Atemzentrums der Versuchsperson (vgl. hierzu 2 die alveoläre Tension) schwanken die Werte in ziemlich weiten Grenzen (2,5 bis 7,0 Vol.-%). Bei Personen, die ruhig und gleichmäßig atmen, stellt sich der CO_2-Gehalt immer auf recht gleichlautende Werte ein. Eine Steigerung der Ventilation hat anfänglich eine Vermehrung der CO_2-Ausgabe zur Folge, an die sich dann eine Verminderung anschließt. Wird sehr CO_2-reiche Luft eingeatmet, so kann das Exspirationsgemisch CO_2-ärmer sein als das Inspirationsgemisch, weil in diesem Falle wegen des hohen Teildruckes der CO_2 in der Lunge bis zur entsprechenden Sättigung CO_2 in den Körper aufgenommen wird (Leimdörfer). Der Sauerstoffgehalt der Exspirationsluft schwankt um einen Mittelwert von 16%, so daß das

Sauerstoffdefizit mit 5% im Durchschnitt angesetzt werden kann. Bei Zufuhr sauerstoffreicher Gemische können geringe Mengen von O_2 durch Absorption an das Blutplasma aus der Inspirationsluft verschwinden. An die Blutkörperchen tritt unter gewöhnlichen Verhältnissen kein Plus an Sauerstoff, wenn der Sauerstoffgehalt der Lungenluft erhöht wird.

Bei hohem Druck des N_2 in der Inspirationsluft verschwinden beträchtliche Mengen von N_2 durch Absorption in den Körper, diese Gasmengen erscheinen wieder, wenn der Teildruck des N_2 erniedrigt wird (siehe oben S. 695). Von letztgenannten Umständen abgesehen, kann aus der Menge von Stickstoff, die während einer bestimmten Zeit ausgeatmet wurde, die Menge Luft berechnet werden, die während derselben Zeit eingeatmet wurde.

Wasserstoff und Methan verlassen beim Pflanzenfresser in beträchtlicher Menge die Lungen (pro Kilogramm Kaninchen und Stunde nach Tacke je 4 ccm H_2 und CH_4 maximal). In der menschlichen Exspirationsluft wurden diese Gase nicht gefunden. Die Frage nach der Ausscheidung von Ammoniak durch die Lunge ist derzeit noch nicht geklärt. Es ist anzunehmen, daß ev. nachweisbares NH_3 aus Fäulnisvorgängen in der Mundhöhle stammt. Von Brown Sequard und d'Arsonval wurde die Behauptung aufgestellt, daß der Exspirationsluft giftige Stoffe beigemengt seien. Man hatte durch Injektion des Kondenswassers der Atemluft Tiere unter Vergiftungserscheinungen getötet. Formanek erbrachte jedoch den Beweis, daß die Exspirationsluft nur dann giftig wirkt, wenn ihr NH_3 aus den Ausscheidungen (Harn und Kot) beigemischt ist. Auch die Schädlichkeit der Luft überfüllter Räume dürfte nicht auf eine Giftigkeit der Exspirationsluft, sondern auf die erhöhte Temperatur und auf die Beimischung flüchtiger, von der Hautoberfläche stammender Substanzen, von viel Wasserdampf und auf den Gehalt an Schwefelwasserstoff zurückzuführen sein.

Der respiratorische Quotient. Die Zusammensetzung der Exspirationsluft wird außer durch die Ventilation auch durch die Art der Verbrennungsvorgänge beeinflußt, die im Körper ablaufen. Werden sauerstoffreiche Stoffe oxydiert, so erscheint relativ mehr Kohlenstoff in Form von CO_2 in der Exspirationsluft und die Menge des gleichzeitig verbrauchten Sauerstoffes sinkt. Bildet man die Verhältniszahl zwischen dem Volumen der gebildeten CO_2 und jenem des verbrauchten Sauerstoffes (CO_2:O_2), so erhält man einen Wert, der von Pflüger als respiratorischer Quotient (RQ) bezeichnet wurde. Bei ausschließlicher Verbrennung von Kohlehydrat, bei der gleich viele Moleküle CO_2 entstehen als Moleküle O_2 verbraucht werden, muß der Quotient gleich Eins werden (bei gleichem Druck und gleicher Temperatur nehmen die Moleküle der einzelnen Gase denselben Raum ein). Für die Fettverbrennung ergibt sich als Mittelwert RQ = 0,707, für Eiweiß RQ = 0,801 und für Alkohol 0,667. Der respiratorische Quotient des Menschen und der Tiere schwankt je nach der Nahrung zwischen 0,70 und 1,0 bei Pflanzenfressern liegt er hoch, bei Fleischfressern im Hunger niedrig. Unter Umständen werden respiratorische Quotienten gefunden, die über 1 liegen. Diese sind in dem Sinne zu deuten, daß sauerstoffreiche Körper in sauerstoffärmere umgebaut worden sind, wie dies z. B. bei der Bildung von Fett aus Kohlehydrat der Fall ist (Bleibtreu). Unter 0,7 wird der Quotient dann sinken, wenn Kohlehydrat aus Eiweiß oder Fett entsteht, wie dies im Diabetes der Fall ist. Auch nach vorangegangener Anstrengung und dadurch erzeugtem Kohlehydratmangel des Körpers sinkt der respiratorische Quotient (Zuntz mit Lehmann und Hagemann bezw. Schumburg, Durig, Porges und Pribram). Ist Ueberventilation vorhergegangen und wird in der Folge CO_2 retiniert, so findet man ebenfalls ein Sinken des RQ (Speck, Loewy). Die Arbeit beeinflußt den respiratorischen Quotienten im allgemeinen nicht; übermäßige körperliche Anstrengung, bei der es zu ungenügender Sauerstoffzufuhr kommt, führt ein Steigen des RQ herbei; dann, wenn die Sauerstoffversorgung wieder zulänglich wird, sinkt der RQ unter die Norm (Loewy). Im Höhenklima (bis 4560 m ü. M.) blieben die respiratorischen Quotienten konstant (Zuntz und Durig). Die Atmung sauerstoffreicher Gemische ändert den RQ nicht, ebensowenig findet eine Verschiebung derselben bei Atmung O_2-armer Gemische statt, insolange der Gehalt der Inspirationsluft nicht unter etwa 10% O_2 sinkt (Loewy 1895, Durig 1903, Benedict 1911). Da der respiratorische Quotient meist kleiner als 1 ist, muß das auf 0° und Trockenheit sowie auf 760 mm Druck reduzierte Volum der ausgeatmeten Luft ein kleineres sein als das der eingeatmeten. Das beobachtete Volum der Exspirationsluft ist wegen der Erwärmung und Sättigung mit Wasserdampf jedoch größer als das eingeatmete.

Atmen abnormer Gasgemische. Die Atmung stickstoffreicher Luft oder einer Luft, in der Stickstoff unter hohem Drucke steht, verändert an und für sich den Chemismus der Atmung nicht. Auch Zufuhr von Wasserstoff oder Grubengas erweist sich als indifferent. Bei Atmen sauerstoffreicher Gasgemische wird O_2 entsprechend dem Absorptionskoeffizienten und dem hohen Teil-

drucke in größerer Menge aufgenommen. Nur dann, wenn vorher Zwischenoxydationsstufen in größerer Menge sich angehäuft hatten, kann mehr O_2 zur Bestreitung von Verbrennungsvorgängen verbraucht werden. Die Oxydation dieser Stoffe spielt sich dann durch direkten Uebertritt von Sauerstoff in der Lunge selbst ab, zum Teil werden aber die reichlicheren, durch das Plasma zugeführten Sauerstoffmengen auch im Gewebe zur Wegschaffung dieser intermediären Produkte Anlaß geben (Sauerstofftherapie; Schaffung einer Besserung des Befindens auf geraume Zeit, bis es wieder zur Anhäufung von intermediären Produkten kommt). Beim Gesunden findet ein Mehrverbrauch von Sauerstoff bei erhöhter O_2-Zufuhr nicht statt (Speck, Loewy, Falloise, Durig, Schaternikoff, Benedict und Higgins 1911). Sauerstoffarme Gemische bis zu 8 bis 9% O_2-Gehalt herab können eben noch ohne Schaden geatmet werden (Loewy). Sauerstoffdrucke von 3 bis 4 Atmosphären wirken tötend (P. Bert, Hermann), die Tiere sterben dabei unter Erstickungserscheinungen (auch Phosphor brennt bei hohem Sauerstoffdruck nicht spontan). Erhöhung des Kohlensäuregehaltes der Inspirationsluft bis zu 4% wird ohne Schädigung ertragen, es steigt hierbei jedoch die Ventilation. Bei 7 bs 8% CO_2-Gehalt treten Schwindel und Ohnmacht auf, 15% CO_2 erzeugen Lähmungen und bei 25% kann wegen der Giftwirkung der CO_2, vielleicht auch wegen der Dissoziation des Oxyhämoglobins selbst bei hohem O_2-Gehalt der Luft der Tod nicht mehr aufgehalten werden.

Kohlenoxyd, Cyanwasserstoff, Arsenwasserstoff, Stickoxydul u. a. wirken, der Inspirationsluft beigemengt, in hinreichenden Dosen tötend. H_2 und CH_4 sind indifferent.

V. Haut- und Darmatmung.

Ebenso wie die Wandungen der Lungenalveolen für Gase durchlässig sind, so sind es auch die Epithelien der Haut und des Darmes. Es muß daher ein Gasaustausch zwischen Gewebe und Blut einerseits und der Luft, die den Körper umhüllt, andererseits zustande kommen. In gleicher Weise müssen die Gase, die sich im Darm vorfinden, in Wechselbeziehung zum Blut treten. Da die zu durchsetzenden Schichten im allgemeinen (s. Darmatmung von Fischen und Oberflächenatmung) dicker sind, die Oberflächen dagegen verschwindend klein gegenüber der Lungenoberfläche genannt werden müssen, ist die Größe des Haut- und Darmgaswechsels gering. Der Haut- und Darmgaswechsel kann bestimmt werden aus der Differenz zwischen dem Lungen- und dem Gesamtgaswechsel oder man ermittelt ihn, indem man den Menschen, den man frei durch ein Rohr nach außen atmen läßt, in einen luftdicht abgeschlossenen Raum (z. B. die Menschendose von Pflüger) einschließt und das Gas, welches in dem abgeschlossenen Raum den Körper umhüllt, analysiert. Es ist zweckmäßig, dabei den Raum zu ventilieren (Zuntz). Die Größe der CO_2-Abgabe durch die Haut kann beim Menschen mit 1½% in Ruhe und mit 4—5% bei schwitzender Haut (bei Arbeit) von jener des Lungengaswechsels angenommen werden. Beim Pferde bestimmten Zuntz und Hagemann den CO_2-Hautgaswechsel mit 2½% des Lungengaswechsels, bei der Taube wird er mit 4% angegeben (Krogh). Für den Durchtritt von Sauerstoff durch die Haut ist weniger als 1% des Lungengaswechsels anzusetzen (Franchini und Preti). Die Unterdrückung der Hautatmung sollte nach älteren Angaben infolge von Giftwirkung zum Tode führen. In den meisten Fällen konnte jedoch Wärmeverlust als Todesursache nachgewiesen werden (Rosenthal), doch können dadurch wohl nicht alle Fälle erklärt werden (Stych und Babák 1905). Die Darmatmung gewinnt bei höher stehenden Tieren nur einige Bedeutung bei den Pflanzenfressern; bei diesen können größere Mengen von CH_4 im Darm zur Resorption gelangen. Werden an O_2 oder CO_2 reiche Gemische in den Darm eingebracht, so wird diesen O_2 bezw. CO_2 entzogen. P. Bert gelang es, ein Kätzchen, dem die Trachea verschlossen war, durch Lufteinblasen in den Darm länger am Leben zu erhalten. Ueber die Darmatmung bei Fischen vgl. S. 707.

VI. Die Gewebsatmung.

Die Atmung der Gewebe kann dadurch geprüft werden, daß man die Veränderungen des Blutes untersucht, welches ein Organ oder Gewebe durchströmt, indem man beim lebenden Tiere den Gasgehalt von Blutproben aus Arterie und Vene bei dem in situ befindlichen Organe bestimmt oder indem man das isolierte Organ künstlich durchblutet (z. B. mit Sauerstoff gesättigter Ringerlösung nach Vernon). Hierbei ist, wenn es sich um ein Sekret bildendes Organ handelt, die Volumsverminderung, welche das abströmende Blut gegenüber dem zugeströmten erfährt, zu berücksichtigen. Die größte Schwierigkeit besteht bei derartigen Versuchen in der richtigen Bestimmung der Blutmenge, die das Organ passierte. Brodie schloß die Organe luftdicht in eine Kapsel ein und sperrte vorübergehend die abführende Vene ab. Aus der Volumsänderung des Organes kann durch dieses onkometrische Verfahren die Menge des eingeströmten arteriellen Blutes bemessen werden. Bei den Untersuchungen über die Atmung überlebender Gewebe ist auf die

Gefahr einer Fälschung der Resultate durch Bakterienwirkung zu achten, es ist auch schwierig, vergleichbare Grundbedingungen in bezug auf den Gasaustausch der Gewebe zu schaffen, da es kaum möglich ist, alle Teile des Gewebes in gleicher Weise mit dem Medium, aus dem dieses atmen soll, in Berührung zu bringen. Um solcher ungenügender, nur an der Oberfläche verlaufender Atmung vorzubeugen, haben Batelli und Stern einen Apparat gebaut, in dem das Gewebe ständig geschüttelt wird. Für die Untersuchung sehr kleiner Gewebsmengen sind die Mikrorespirometer (Thunberg, Winterstein) vorzügliche Instrumente.

Wie die Spannungsdifferenz die treibende Kraft ist, welche das Strömen der Gase vom Orte höheren Teildruckes gegen jenen niederen Teildruckes in der Lunge bedingt, sind es auch die Unterschiede in den Gasspannungen, die im Gewebe den Anlaß zum Gasaustausch geben. Eine spezifische, gassekretorische Tätigkeit der Endothelzellen der Blutkapillaren wurde noch durch keinen Befund in den Bereich der Wahrscheinlichkeit gerückt. Da der Sauerstoffdruck in den Geweben jedenfalls außerordentlich niedrig ist und wohl gleich 0 gesetzt werden kann, strömt der O_2 dem Gefälle entsprechend aus dem Blutplasma nach dem Gewebe ab. Nach Zuntz und Loewy ist das O_2-Gefälle dabei so vollkommen zureichend, daß unter normalen Verhältnissen auch der maximalste Sauerstoffbedarf des Gewebes durch Diffusion gedeckt werden kann. Das Abströmen des O_2 aus dem Plasma bedingt dann, wenn der Sauerstoffdruck im Plasma hinreichend erniedrigt ist, eine Dissoziation von Oxyhämoglobin und Uebertritt von O_2 aus diesem an das Plasma und wieder weiterhin an das Gewebe. Die Annahme, daß das Gewebe selbst nur einen verschwindend kleinen Sauerstoffdruck aufweisen kann, ergibt sich daraus, daß durch die Gaspumpe Sauerstoff aus dem Gewebe nicht erhalten werden kann (Hermann), auch zeigen die aus dem Körper entnommenen Gewebe kräftige Reduktionswirkungen. Im selben Sinne spricht die Tatsache, daß die Lymphe, die Flüssigkeit in serösen Höhlen und auch die meisten Sekrete sehr O_2-arm sind (Pflüger und Straßburg, Hammarsten). Die Anschauung, daß im Gewebe Sauerstoffdepots vorhanden seien, wurde wiederholt verfochten. Sie stützte sich unter anderem auf die Erfahrung, daß ein Froschmuskel auch im Vakuum noch einige Zeit in Tätigkeit zu versetzen ist und ebensoviel CO_2 produziert, wie bei Versorgung mit Sauerstoff (Hermann). Durch Winterstein (Habilitationsschrift 1906, Rostock; 1907 Ztschr. f. allg. Phys.) wurde jedoch am Froschrückenmark in Uebereinstimmung mit den Versuchen von Pflüger, Hermann und Lesser nachgewiesen, daß solche Sauerstoffdepots nicht bestehen und daß das Gewebe die Fähigkeit besitzt, unter Schädigung des Protoplasmas und bei unökonomischem Zerfall sauerstoffhaltiger Verbindungen ohne Zufuhr von äußerem O_2, Energie zu produzieren (s. a. Zuntz, Festrede 1908). Es wird dabei vielleicht der beim Zerfall entstehende O_2 zur Oxydation verwertet, was man unter Annahme des Entstehens superoxydartiger Körper (z. B. Fränkl und Dimitz 1909) als Zwischenprodukte, die dann den Sauerstoff abgeben, erklärlich machen könnte. Jedenfalls werden die Spaltungen zu einem guten Teil nur bis zu Zwischenprodukten geführt. Wahrscheinlicher ist es jedoch, daß die Produktion von CO_2 und Energie hierbei auf Grund rein enzymatischer Spaltungen stattfindet, ohne daß Oxydationsvorgänge ablaufen dürften.

Die Beweiskraft der Versuche, welche das Fehlen von Sauerstoffdepots dartun, wird zur Zeit noch bestritten (Verworn).

Das Fehlen solcher Depots kann auch dadurch wahrscheinlich gemacht werden, daß, wie bereits oben erwähnt, bei der Atmung sehr sauerstoffreicher Gemische nicht mehr an O_2 verbraucht wird, als bei der Atmung eines Gases, das noch weniger als 10 % O_2 enthält. Durch dieses Ergebnis ist auch bewiesen, daß die Höhe der Oxydationsvorgänge durch Mehrzufuhr von O_2 nicht gesteigert werden kann. Auch im Anschluß an die erschöpfende Muskelarbeit wird nicht mehr O_2 verbraucht (Zuntz).

Bei Limax und Tenebrio ist nach Thunberg (1905) der Stoffwechsel von der Sauerstoffzufuhr abhängig (Einwände dagegen s. bei Atmung von Lumbricus.

Die CO_2-Spannung im Gewebe ist hoch und zwar höher als jene des venösen Blutes. Dementsprechend strömt die CO_2 aus den Geweben dem Blute zu und bedingt in diesem eine gesteigerte Dissoziation des Oxyhämoglobins, so daß unter dem Einflusse des höheren CO_2-Druckes mehr O_2 freigemacht und den Geweben zur Verfügung gestellt werden kann. Das Auftreten saurer Abbauprodukte steigert die Kohlensäurespannung im Gewebe. Sinken der CO_2-Spannung im Gewebe vermindert die Dissoziationsspannung des Oxyhämoglobins, und dadurch soll die Sauerstoffversorgung ungünstig beeinflußt werden (Bohr), demgegenüber ist jedoch zu bedenken, daß bei niederer CO_2-Spannung im Gewebe in der Regel auch die CO_2-Spannung in der Lunge niedrig ist und infolgedessen größere O_2-Mengen in der Lunge gebunden werden, so daß die verminderte Dissoziation im Gewebe bei niederem CO_2-Druck durch gesteigerte O_2-Aufnahme und Zufuhr im arteriellen Blute zu einem Teile kompensiert werden dürfte.

Die günstige Wirkung von CO_2-Inhalation unter vermindertem Luftdruck ist demnach wohl, abweichend von der Annahme Bohrs, auf Vertiefung der Atmung und Steigerung der alveolären O_2-Spannung in erster Linie zurückzuführen. Einwände gegen die Akapnie-Theorie Mossos erhebt A. Loewy 1898.)

Bei der Bestimmung des Gaswechsels im Gewebe sind die Ergebnisse der Sauerstoffanalysen das Ausschlaggebende. Es wurde gefunden, daß die Gewebe bei steigender Temperatur einen größeren, bei sinkender einen geringeren Sauerstoffverbrauch aufweisen. Arbeit erhöht den O_2-Verbrauch bis auf das 35 fache (Chauveau). Beim Muskel werden gefunden pro Gramm und Minute 0,004 ccm O_2-Verbrauch in Ruhe, beim Herzen 0,019 ccm (Barcroft). Nach Richet entfallen 92 % des gesamten Gewebsstoffwechsels in Körperruhe auf die Muskeln. Diese Annahme ist jedoch jedenfalls um das Doppelte zu hoch (Barcroft 1908). Auch im zentralen Nervensystem und im peripheren Nerven wurde der Gaswechsel untersucht (Fröhlich, Hill und Nabarro, v. Baeyer, Winterstein, Thunberg ausführliche Bearbeitung bei Barcroft: Ergebn. d. Phys. VII S. 699; dort auch Diskussion über die Wirkung der Gewebe auf Farbstoffe).

Ueber die Vorgänge bei der Oxydation im Körper wissen wir noch wenig Bestimmtes. Die größte Schwierigkeit liegt in der Entscheidung darüber, wie im Körper organische Verbindungen oxydiert werden können, die außerhalb des Körpers nicht oder nur langsam Verbindungen mit dem O_2 eingehen. Die Annahme von Oxydasen, deren Vorkommen im Blut bestritten wird, sowie jene vom Auftreten aktiven Sauerstoffes, liefert derzeit noch keine befriedigenden und ausreichenden Erklärungen, immerhin weisen die neuesten Untersuchungen auf eine Möglichkeit der Erklärung hin (Unna 1911). Es ist wahrscheinlich, daß primär Spaltungsvorgänge auftreten, die zur Bildung intermediärer Produkte führen, denen man bei der Anaerobiose und bei O_2-Mangel begegnet, diese Stoffe würden dann erst zur Oxydation gelangen. Aufbauend auf den Vorstellungen Hermanns und Pflügers hat Verworn (1903) in der Biogenhypothese folgende Vorstellung entwickelt: Das lebendige Eiweißmolekül, das Biogen, ist einem ständigen Stoffwechsel unterworfen; es stellt ein äußerst leicht zerfallendes Molekül vor, von dem locker gebundener, intramolekulärer Sauerstoff leicht abgespalten wird. Der Dissimilationsvorgang am Biogenmolekül besteht nach der Theorie darin, daß der Sauerstoff abgespalten wird und sich mit den oxydablen Gruppen des Biogens verbindet und so Endprodukte bildet, die aus dem Biogenmolekül ausgestoßen werden. Diesem Dissimilationsvorgang muß eine Assimilation folgen, bei der der Rest des Biogenmoleküls sich durch Neuaufnahme oxydabler Gruppen und intramolekulären Sauerstoffes synthetisch regeneriert. Es würde demnach nur solcher Sauerstoff, der Zellbestandteil im Biogenmolekül geworden ist, der Oxydation dienen. Nach Wintersteins Annahme soll im Gegensatz hierzu der Sauerstoff, ohne in das Biogenmolekül einzutreten, direkt an die leicht oxydablen Spaltungsprodukte treten und sich mit diesen verbinden. Bedeutungsvoll ist die Tatsache, daß Narkose die O_2-Aufnahme erstickter Zellen verhindert (Fröhlich, Winterstein) und die Oxydationsprozesse überhaupt herabsetzt.

Noch einer Annahme ist an dieser Stelle Erwähnung zu tun. Durch Batelli und Stern wurden aus dem tierischen Gewebe Substanzen extrahiert, die die Fähigkeit besitzen, die Gewebsatmung anzuregen. Der wirksame Stoff wurde von den Autoren als Pnein bezeichnet (1908), er unterscheidet sich von den Oxydationsfermenten, die aus dem Gewebe extrahiert werden können und auch in Abwesenheit lebendiger Zellsubstanz wirken dadurch, daß seine Wirkung durch Tripsinverdauung aufgehoben wird. Das Pnein soll die „Hauptatmung" des Gewebes auslösen (1911).

VII. Die Größe des Gesamtgaswechsels

vgl. auch den Artikel „Stoffwechsel".

Kennt man die Größe der Ventilation und die Zusammensetzung der ein- und ausgeatmeten Luft, so kann man daraus die Menge der in der Zeiteinheit produzierten Kohlensäure und die Größe des Sauerstoffverbrauches berechnen. Für den vollkommen bewegungslos liegenden oder schlafenden Menschen ergeben sich dabei 5,5 mg = 2,8 ccm CO_2-Produktion pro Kilogramm und Minute und ein Sauerstoffverbrauch, bezogen auf dieselbe Grundlage von 5,1 mg = 3,5 ccm. Korrekter werden die Werte auf das Quadratmeter Körperoberfläche bezogen, sie lauten dann rund 179 mg O_2 Verbrauch und 180 mg CO_2 Produktion pro Minute (Grundumsatz oder Erhaltungsumsatz), bei manchen Menschen sind abweichend davon noch wesentlich niedrigere Werte beobachtet werden (Loewy 1910). Je nach der Größe der Muskelarbeit wachsen diese Mengen bedeutend an. Vergleicht man die entsprechenden Werte bei nur ruhenden Menschen, die jedoch nicht vollkommen bewegungslos liegen, so findet man, daß die Werte bereits durch dieses geringe Plus an Muskelinnervation um 25 % erhöht sind (Johansson); bei angestrengter Arbeit steigern sich CO_2-Produktion und O_2-Verbrauch auf das Zehnfache. Im Durchschnitt

können 9 mg CO_2 pro Kilogramm und Minute für den nicht arbeitenden Menschen als Mittelwert angenommen werden (Tigerstedt). Für Tiere können folgende Näherungswerte pro Kilogramm und Minute namhaft gemacht werden: Pferd (Ruhe) 8 mgr; Rind, Schaf, Ziege, Schwein 12 mgr; Hund, Katze 18 mgr; Sperling 180 mgr; Frosch 2 mgr. Zur Arbeit ist auch die Verdauungsarbeit zu zählen, demnach steigen CO_2-Produktion und O_2-Verbrauch die man schlechtweg als Ausdruck des Umsatzes anspricht, nach jeder Nahrungsaufnahme. Will man daher den Erhaltungsumsatz feststellen, so muß die Versuchsperson sich nicht nur bewegungslos ruhig verhalten, sondern es muß auch die Nachwirkung vorangegangener Nahrungsaufnahme vollkommen ausgeschlossen sein.

Vergleicht man die Höhe des Erhaltungsumsatzes unter verschiedenen Bedingungen (vgl. den Artikel „Stoffwechsel" sowie Loewy in Oppenheimers Handbuch IV), so erkennt man folgende hauptsächlichste Gesetzmäßigkeiten: Der Erhaltungsumsatz ist bei Kindern größer, bei Greisen kleiner als bei Erwachsenen mittleren Lebensalters (Magnus-Levy und Falk, Sondén und Tigerstedt). Die Ursache hierfür kann vielleicht in Unterschieden im Muskeltonus erblickt werden. Das Geschlecht ist ohne wesentlichen Einfluß auf den Umsatz. Narcotica beeinflussen im allgemeinen den Erhaltungsumsatz des Menschen nicht (Loewy 1891); bei Tieren werden durch den Wegfall von Muskelspannungen meist die in Ruhe gefundenen Werte bei Verabreichung von Narcoticis gedrückt. Unter dem Einfluß der Umgebungstemperatur findet eine Umsatzsteigerung statt, wenn die Temperatur des Protoplasmas erhöht wird (Pflüger 1878). Ein Sinken der Protoplasmatemperatur führt zur Abnahme der Verbrennungsvorgänge. Insofern bestehen Analogien zwischen Warm- und Kaltblüter; durchgreifend ist der Unterschied zwischen beiden insofern, als der Warmblüter durch seine Regulationsmechanismen (die mechanische Regulation) bestrebt ist, möglichst lange einem Sinken oder Steigen der normalen Protoplasmatemperatur entgegenzuarbeiten. Es darf jedoch nicht übersehen werden, daß Kälte allein, ohne gleichzeitige Muskeltätigkeit ebensowenig zu einem Ansteigen der chemischen Umsetzungen im Körper führt wie Wärmewirkung an und für sich zu einem Sinken der Verbrennungen Anlaß gibt. (Speck 1883, Loewy 1889, Johansson 1897). Wird beim Warmblüter die Körpertemperatur durch Muskelaktion (Muskelspannung und Zittern) reguliert, dann wächst natürlich der Gaswechsel, es steigen die CO_2-Produktion und der O_2-Verbrauch wie bei jeder Arbeit. Es ist daher begreiflich, daß alle Versuche, die über die Wirkung der Bekleidung oder über Erwärmung und Abkühlung ausgeführt wurden und in denen Schlüsse auf die Wärmeregulation aus der Größe von O_2-Verbrauch und CO_2-Produktion gezogen wurden, mit größter Vorsicht beurteilt werden müssen, wenn bei ihnen nicht vollkommene Muskelruhe eingehalten wurde. Im selben Sinne dürfte wohl auch die bei kleinen Tieren (Kaninchen, Meerschweinchen und Hunden) konstant beobachtete Erhöhung der Verbrennungsvorgänge bei herabgesetzter Temperatur auf reflektorisch gesteigerte Muskeltätigkeit zurückzuführen sein. Einen geringen, allerdings nicht einmal sicher zu behauptenden Einfluß der Temperatur auf die CO_2-Ausscheidung fanden Ignatius, Wärri und Lund (1908). Hierbei muß übrigens auch bedacht werden, daß die Größe der CO_2-Ausscheidung allein noch keine Rückschlüsse auf die Wärmebildung gestattet, da der kalorische Wert der CO_2 ein sehr schwankender sein kann und nicht nur durch die Höhe der RQ, sondern auch wesentlich durch die Atemmechanik, die sich ja manchmal mit der Temperatur ändert, beeinflußt wird. Die Jahreszeit (Sommer und Winter) sowie verschiedene Klimate, so auch das Seeklima, sind ohne Einfluß auf die Höhe der Verbrennungsvorgänge in Körperruhe (Eijkmann, Loewy und Müller, Durig und Zuntz). Intensivere Belichtung führte in den Versuchen von Zuntz, Durig und v. Schrötter (1911) und Hasselbalch zu keiner Steigerung der CO_2-Produktion, dagegen war während der Polarnacht bei allerdings nicht eindeutigen Versuchsbedingungen eine Verminderung zu beobachten (Lindhard 1910). Die Einwirkung von Radiumemanation (Caspari und Aschkinas, Loewy und Plesch 1911), von Teslaströmen (Loewy), wechselnder Höhe des Potentialgefälles und der Luftionisation (Zuntz und Durig, Reichel 1910) veränderte die Höhe der Verbrennungsvorgänge nicht. Es stellt sich demnach die Größe der CO_2-Produktion und des O_2-Verbrauches (der Erhaltungsumsatz) als ein außerordentlich konstanter Wert dar, der unter den verschiedensten Bedingungen unverändert bleibt. Auch im Verlaufe von Jahrzehnten werden bei ein und derselben Person immer gleichhohe Werte für den Erhaltungsumsatz gefunden (Loewy 1910).

Eine nicht unbeträchtliche Erhöhung des Erhaltungsumsatzes wird in großer Höhe unter der Wirkung verminderten Luftdruckes beobachtet. Diese Steigerung der Oxydationsvorgänge ist nicht ausschließlich

durch die Erhöhung der Atemarbeit erklärlich (Zuntz und Durig 1903; Durig 1909).

Die Untersuchung des Gaswechsels bei der Arbeit ergab, daß konstante Beziehungen zwischen der Größe der Arbeit und der Höhe von Sauerstoffverbrauch und CO_2-Produktion bestehen (Arbeitsgaswechsel). Es ist möglich, aus dem Gaswechsel indirekt die Höhe des Energiewechsels zu berechnen.

Berechnung des Energieumsatzes aus CO_2-Produktion und O_2-Verbrauch. Nach den von Zuntz angegebenen Prinzipien kann aus der Höhe des respiratorischen Quotienten und der Größe des O_2-Verbrauches der Energieumsatz berechnet werden. Die Ueberlegung ist folgende: Würde der $RQ = 1$ gefunden, so wäre nur Kohlehydrat verbrannt worden. Pro 1 g Kohlehydrat werden 1,185 g O_2 verbraucht und 4,18 Kal. erzeugt. Es entspricht also einem Liter O_2-Verbrauch eine Produktion von 5,05 Kal. (kalorischer Wert des O_2 bei der Verbrennung von Kohlehydrat). Bei Verbrennung von Fett ist der Wert für $RQ = 0{,}707$. Ein Gramm Fett liefert unter Verbrauch von 2,89 g O_2 bei der Oxydation 9,46 Kal., weshalb dem Verbrauch von 1 l O_2 für Fettverbrennung eine Produktion von 4,69 Kal. entspricht. Da das Eiweiß in der Regel nur einen ganz geringen Anteil am Stoffwechsel nimmt (kaum $^1/_6$ der Gesamtenergie), so ist es zulässig, bei der Aehnlichkeit der kalorischen Werte des O_2, die Eiweißverbrennung gar nicht gesondert zu berücksichtigen und nur so zu rechnen, als ob ausschließlich Fett und Kohlehydrat verbrannt wären (Magnus-Levy). Aus obengenannten Zahlen geht hervor, daß beim Anwachsen des RQ von 0,707 bis 1 eine Steigerung des kalorischen Wertes des Sauerstoffes stattfindet, die für den Anstieg des RQ um 0,001 einem Wert von 0,00123 Kal. entspricht. Es ergibt sich daraus der kalorische Wert des Sauerstoffes für jeden beliebigen zwischen 0,707 und 1,0 gelegene RQ (die Werte finden sich in Tabellen). Ist die Höhe des Sauerstoffverbrauches aus dem Respirationsversuch bekannt und der RQ durch die Analyse von CO_2 und O_2 ermittelt, kann die Höhe des Erhaltungsumsatzes leicht in Kalorien ausgedrückt werden. Analog wird im Versuch bei Arbeitsleistung der Gesamtumsatz berechnet. Wird von diesem der Wert des Erhaltungsumsatzes in Kalorien subtrahiert, erübrigt der Verbrauch von Kalorien die ausschließlich für die Arbeit verausgabt wurden. Weiteres siehe im Artikel „Stoffwechsel," sowie bei Tigerstedt, Handb. d. physiol. Methodik I, 3 S. 73ff.

Bildet man den Quotienten aus produzierter mechanischer Energie und hierfür aufgewendeter Energie erhält man einen Wert, der als Wirkungsgrad bezeichnet wird. Es sei darauf hingewiesen, daß der Aufwand für die Leistung von 1 mkg Steigarbeit etwa 8 kleine Kal., jener für die Fortbewegung von 1 kg entlang einem Meter Weg (horizontales Gehen) etwa 0,5 kleine Kal. beträgt, größer ist der Verbrauch beim Drehen an einem Rad. (Atwater 1904, Reach 1908). Der Wirkungsgrad dürfte im günstigsten Falle etwa 33% erreichen (Zuntz, Lehmann, Hagemann 1889 und 1898). Die Steigerung der Leistung über eine gewisse Größe hat ein um so stärkeres Anwachsen des Verbrauches für die Arbeitseinheit zur Folge, je mehr die Leistung erhöht wird (Zuntz 1897, Durig, Reichel 1910). Durch das Training wird größere Oekonomie der Arbeitsleistung erzielt, durch Zufuhr von Alkohol während der Arbeit wird die Oekonomie verschlechtert (Gruber, Zuntz, Loewy, Müller, Caspari 1906; Durig 1906 und 1909).

VIII. Der embryonale Gaswechsel. Nach Bohr ist der Gaswechsel des Embryos bezogen auf die Gewichtseinheit größer als jener des Muttertieres. Beim Hühnerei fanden Bohr und Hasselbalch, daß der Gaswechsel parallel mit der Entwickelung zunimmt und im Verhältnis dem ausgewachsenen Hühnchen entspricht. Im Ei der Vögel tritt das Blut, das im Allantoiskreislauf strömt mit der Außenluft in Gasaustausch. Die Gase müssen auch die Eischale durchsetzen. Bei den Tieren, welche Plazenten besitzen, findet die Atmung infolge des Gasaustausches in der Plazenta statt. Nach Bohr soll (ähnlich wie er dies für die Lunge annahm) ein beträchtlicher Teil der Oxydation der beim Zellstoffwechsel entstandenen Produkte erst in der Plazenta erfolgen. Es kann jedoch ebenso wie bei der Lunge angenommen werden, daß außer dem, der Plazenta wie jedem anderen Gewebe zukommenden Stoffumsatz, unter normalen Bedingungen eine Oxydation von solchen unvollständig oxydierten Stoffen in der Plazenta nicht stattfindet. Der Uebertritt der CO_2 und des O_2 vermag sich in der Plazenta ganz und in vollkommen zureichender Weise auf Grund der Spannungsdifferenzen zwischen kindlichem und mütterlichem Blut zu vollziehen. Die Bedingungen für den Gasaustausch liegen bei der Plazentaratmung sogar noch günstiger als bei der Kiemenatmung. Zudem ist zu bedenken, daß die Wanderung des in die Zellen eingetretenen O_2 zu den Blutgefäßen dadurch erleichtert wird, daß sich in den Plazentarzotten eine fettdurchsetzte Grenzschicht findet, die ein größeres Lösungsvermögen für O_2 besitzt als Wasser (Hofbauer 1905). Für die Annahme der Wirkung eines besonderen Oxydationsfermentes in der Plazenta und für die Theorie aktiver Gassekretion in der Plazenta liegen derzeit keine zwingenden

Beweise vor, zum mindesten besteht keine Notwendigkeit, bei der Frage der Deckung des Gasaustausches auf solche Momente zurückzugreifen (L. Zuntz Ergebn. d. Phys. VII 1908). Bezüglich der Atemmechanik sei erwähnt, daß der Embryo nach neuen Beobachtungen bereits intrauterin regelmäßige, rhythmische dem späteren Extrauterinleben entsprechende Atembewegungen ausführen soll (Reifferscheid 1911).

IX. Der Gaswechsel der Winterschläfer. Der Winterschläfer besitzt die Fähigkeit, zu bestimmten Zeiten aus einem homoiothermen zum poikilothermen Tier zu werden. Im Winterschlaf stellt sich die Funktion der Organe auf einen Mindestwert ein. Das Einschlafen geschieht unter Herabsetzung des Stoffwechsels und damit auch der Zirkulation und der Atmung. Eine Voraussetzung für das Zustandekommen des Schlafes ist eine Veränderung der Erregbarkeit nervöser Zentra, vor allem eine Einstellung der wärmeregulierenden Zentra auf eine andere Erregbarkeitsschwelle (Reizschwelle). Eine Abkühlung der Winterschläfer auf noch niederere Temperatur löst bei diesen ausgesprochene Wärmeregulation aus und erst wenn dieses mechanische Entgegenwirken gegen den Wärmeverlust nicht mehr zureichend ist, sinkt die Körperwärme des Winterschläfers weiter; dieser verhält sich dann, wie ein unter die Norm abgekühlter Warmblüter. Das Charakteristikum des Winterschlafes ist gegeben durch die Fähigkeit „kalt zu werden und kalt zu bleiben“ (Merzbacher 1904) Bei der Winterschlaftemperatur steigt und fällt der Gaswechsel der Tiere, ebenso wie beim Kaltblüter mit den Schwankungen der Temperatur. Im Winterschlafe ist nicht nur die Regulation durch die Zentren auf die veränderte Größe des Umsatzes eingestellt sondern es kommt auch dem Gewebe des Winterschläfers die Fähigkeit zu, seine Verbrennungsvorgänge sehr weit einzuschränken und weniger zu atmen. Dies wird durch die Tatsache bewiesen, daß das Herz eines winterschlafenden Murmeltieres ebenso wie das eines Kaltblüters, wenn es aus dem Körper ausgeschnitten ist, noch stundenlang weiterschlägt. Verminderte O_2-Zufuhr, niederer Luftdruck, Zumischung von Gasen (CO), die die Sauerstoffbindung des Hämoglobins herabsetzen, werden von Winterschläfern gut vertragen. Dies ist nicht nur durch die geringe Größe des Sauerstoffbedarfes bedingt, sondern es muß angenommen werden, daß das Atemzentrum des Winterschläfers durch dauernden O_2-Mangel gegen die Reizung durch intermediäre Abbauprodukte weniger empfindlich ist. In diesem Sinne spricht ein Versuch Claude Bernards. Vögel, denen allmählich der Sauerstoff entzogen wird, vermögen noch in einer Luft zu leben, in der frisch eingebrachte Vögel sofort zugrunde gehen würden. Hierbei sank bei den gewöhnten Vögeln die Körpertemperatur von 41 auf 31 ° ab, die Atemfrequenz, der Puls und der Umsatz verminderten sich, die Tiere näherten sich in ihren Eigenschaften also den Winterschläfern. Analoges beobachtet man auch bei Mäusen, die wiederholt an die Grenze des Erstickens gebracht werden (Kreidl 1911). Die Größe von O_2-Verbrauch und CO_2-Produktion wechselt beim Winterschläfer mit der Tiefe des Schlafes und der Temperatur. Im eigentlichen Schlaf sinkt der O_2-Verbrauch z. B. beim Murmeltier bis auf ein zwanzigstel desjenigen im Wachen (Zuntz). Die respiratorischen Quotienten liegen vielfach unter 0,7 und können bis auf 0,4 (Regnault und Reiset) absinken. Die Erklärung für dieses Verhalten liegt in der Bildung von Glykogen aus Fett. Hierdurch ist es auch erklärlich, daß Winterschläfer ab und zu im Schlafe sogar etwas an Gewicht zunehmen, falls die CO_2-Produktion um vieles geringer ist, als der O_2-Verbrauch. Beim Erwachen steigt der RQ; dabei geschieht die Erwärmung des Tieres vor allem auf Kosten von Kohlehydratverbrennung. Erwärmt sich das wache Tier unter lebhaften Muskelbewegungen, so wird weniger Glykogen und mehr Fett verbrannt und der RQ steigt nur auf wesentlich geringere Werte (Weinland 1911).

X. Der Gaswechsel kaltblütiger Tiere (über die Atembewegungen siehe auch Baglioni Ergebn. d. Phys. IX S. 90 1910). Bei den Fischen wirkt Erwärmung beschleunigend auf die Atmung. Auch bei ihnen findet sich ein deutlich ausgesprochenes, dominierendes Atemzentrum, das die Rhythmik der Atembewegungen bedingt. Auf nervösem Wege findet eine Steuerung nach Art der Hering-Breuerschen statt. Atemreflexe werden auf alle mechanischen Reize hin, welche die Körperoberfläche oder die Maulhöhle treffen, ausgelöst (Baglioni, Deganello 1908). Nach Babàk (1909) ist Sauerstoffmangel der eigentliche Atemreiz bei den Fischen. Hoher O_2-Gehalt führt zur Apnoe, O_2-Mangel löst Steigerung der Ventilation aus. Die Annahme Baglionis, daß das Wasser einen spezifischen Atemreiz für die Fische vorstelle, ist durch Rynberk (1910) widerlegt worden. Die Fische verhalten sich in Oel analog wie in Wasser.

Bei Sauerstoffmangel schnappen manche Fische an der Oberfläche Luft und vermischen sie mit dem Atemwasser um günstigere Verhältnisse für die O_2-Versorgung zu schaffen (Winterstein). Fische sind gegen höhere CO_2-Tensionen empfindlich. Sie werden bei 60 mm CO_2-Tension getötet, geringere CO_2-Mengen bewirken krampfhafte Mundbe-

wegungen, Gleichgewichtsstörungen und dyspnoische Atmung. Eine Vermehrung des Sauerstoffgehaltes des Wassers führte zu Verminderung der Atemtiefe und hatte eine Frequenzabnahme zur Folge (Reuß). Elementarer Stickstoff tritt auch bei Fischen nicht in die chemischen Umsetzungen ein, dagegen wird CO_2 auch in Form von Karbonaten in chemischer Bindung durch die Kiemen abgegeben (Reguard). Die Größe des kalorischen Umsatzes geht wie bei Säugern annähernd der Körperoberfläche parallel. Die Höhe der Verbrennungsvorgänge steigt mit der Temperatur und ebenso auch bei Arbeit also auch nach Nahrungsaufnahme (Knauthe). Hoher Sauerstoffdruck ist ohne Einfluß auf die Größe der Verbrennungsvorgänge (Winterstein), die Sauerstoffdrucke können wesentlich sinken, bevor Zeichen von Sauerstoffmangel beobachtet werden. Der respiratorische Quotient liegt bei Fischen in der Regel zwischen 0,74 und 0,88 (Cronheim in Oppenheimer's Handbuch IV, 12). Darmatmung findet sich in ausgesprochener Weise beim Schlammpeitzger, der Luft schluckt und diese an O_2 verarmt wieder durch den After entleert. Ein dichtes Blutgefäßnetz ermöglicht hinreichend raschen Gasaustausch zwischen Luft und Blut. Die CO_2 wird bei diesem Fisch hauptsächlich durch die Haut abgegeben.

Die Hautatmung der Fische ist sonst noch wenig untersucht. Durch Krogh wurde nachgewiesen, daß Aale bei niederer Temperatur ihren ganzen O_2-Bedarf durch die Haut zu decken vermögen.

Die Schwimmblase stellt nach der herrschenden Ansicht ein Organ mit hydrostatischer Funktion vor (Bohr, Biot). Auch bei Insektenlarven (Corethra) kommen Schwimmblasen vor, die gleichfalls als statisches Organ wirken, ähnlich wie die Behälter bei Unterseebooten (Krogh 1911). Das Gas, welches die Blase enthält, stammt aus dem Blute und wird durch ein eigenes drüsiges Organ in der Blasenwand unter Leistung von Arbeit sezerniert (s. S. 697). Nach Durchschneidung der zugehörigen Nerven sistiert die O_2-Sekretion.

Die Atmung der Frösche, Kröten und Salamander. Es findet sich Lungen- und Hautatmung, außerdem Kiemenatmung. Der Gasaustausch erfolgt, wie Krogh annimmt, auf Grund physikalischer und sekretorischer Vorgänge. Die O_2-Aufnahme findet hauptsächlich durch die Lungen, die CO_2-Abgabe in größerem Umfange durch die Haut statt. Der Atemtypus ist ein recht wechselnder, er wird durch ein Zentrum und zentrifugale wie zentripetale Nerven beeinflußt. Beiderseitige Vagotomie führt zu unregelmäßiger Atmung. Als Atemreize wirken alle Einflüsse auf die äußere Haut. Nach Kokainisierung der äußeren Haut und beiderseitigen Vagotomie tritt Atemstillstand auf, der nach Wegwaschen des Kokains wieder verschwindet. Während die Froschlarven ebenso wie die Fische ein hauptsächlich durch O_2-Mangel erregbares Atemzentrum besitzen, verliert das Atemzentrum bei der Entwickelung der Tiere diese Eigenschaft und wird für den CO_2-Reiz empfindlicher. Es sind bei ausgewachsenen Urodelen und Salamandern zwei Atemzentren anzunehmen, eines welches die Kehlatmung und eines, das die Lungenatmung reguliert. Die beiden Zentren sind auf O_2-Mangel und CO_2-Reiz verschieden empfindlich (Babák und Kühnová 1909). Zur Paarungszeit ist eine Steigerung der CO_2-Produktion vorhanden (Bohr, Krogh), auch die Jahreszeit ist nach manchen Autoren von Einfluß. Nach Vernon besteht ein Parallelismus zwischen der Höhe der Temperatur und der Größe des respiratorisch gemessenen Umsatzes beim Frosch nur dann, wenn eine mittlere Temperaturgrenze nach oben oder unten überschritten wird. Nach Couvreur ist die CO_2-Abgabe beim Wassersalamander kleiner als beim Landsalamander. Die Abgabe an Wasserdampf ist bei Wassersalamandern in der Luft größer. Frösche, die an Wasser verarmt sind (Dursten und Austrocknen), vermögen ihren Wasservorrat aus Wasserdampf gesättigter Luft allein nicht zu ersetzen (Durig). (Ausführliches bei Cronheim in Oppenheimers Handbuch IV, 2).

Gaswechsel Wirbelloser (Weinland in Oppenheimers Handbuch IV, 2). Die Eier der Lepidopteren zeigen einen Gaswechsel, der mit der Temperatur steigt und fällt. Dauernder O_2-Mangel führt zu Asphyxie und zum Tod. Während der ersten Entwickelung der Eier ist der Gaswechsel sehr lebhaft (Sommerperiode), dann folgt eine Winterschlafperiode, in der der Gaswechsel fast sistiert. Während der eigentlichen Entwickelungsperiode wächst der Stoffwechsel mächtig an (Farkas) und erreicht sehr hohe Werte beim Ausschlüpfen. Bei spinnreifen Seidenraupen wurden respiratorische Quotienten von 0,78 bis 0,81 und pro 100 g Tier und Tag rund 2 g CO_2-Produktion gefunden.

Der Gaswechsel der Puppen verläuft auf Grund physikalischer Vorgänge, er ist abhängig von der Temperatur (v. Brücke), jedoch nicht beeinflußbar durch Belichtung (Loeb). Die Annahme v. Lindens, daß Puppen und Raupen der Lepidopteren gasförmig aufgenommenen N_2 oder CO_2 synthetisch zum Aufbau organischer Substanz verwenden können, darf als widerlegt gelten (v. Brücke). Ueber den Gaswechsel

der Hymenopteren wissen wir wenig Sicheres; es sollen Bienen pro Kilogramm und Stunde bei 20° Umgebungstemperatur 17 l CO_2 produzieren (Marie Parhon 1909), die Angabe wird mit Recht von Weinland bezweifelt.

Eingehende und gründliche Untersuchungen über den Gaswechsel von Dipteren (Calliphora) stammen von Weinland. Während der Metamorphose der Tiere sinkt unter Zersetzung des Larvengewebes der Gaswechsel ab und hält sich auf einem konstanten Wert. Zur Zeit der Bildung des Imago steigt er an und erreicht eine maximale Größe vor dem Ausschlüpfen. Ausgewachsene Larven produzieren pro 100 g 3,3 g CO_2 pro Tag. N_2 wird in Form von NH_3 in beträchtlicher Menge ausgeschieden (bezüglich des Stoffwechsels l. c.). Coleopteren: Maikäfer gaben in Versuchen von Regnault und Reiset pro 100 g Tier und Tag 2,7 g CO_2 ab und verbrauchten 2,4 g O_2, ihr RQ betrug 0,8 im Mittel. Mehlwürmer lieferten in Thunbergs Beobachtungen pro Tag und 100 g 1,15 g CO_2. In O_2 freier Atmosphäre wurde durch Mehlwürmer mehr als einen Tag lang CO_2, allerdings in verminderter Menge produziert. Unter Sauerstoffmangel wird der Stoffwechsel eingeschränkt. Aus CO_2-reicher Luft nehmen Mehlwürmer durch Stunden hindurch beträchtliche Mengen von CO_2 auf. Orthopteren passen ihren Gaswechsel der Temperatur an (Verworn). Bei den Crustaceen kommt zu einem Teil die Sauerstoffversorgung durch das Hämocyanin in Betracht. Man fand beim Flußkrebs pro Kilogramm und Stunde einen O_2-Verbrauch von 38 ccm, bei Palaemon und dem Flohkrebs betrug der Verbrauch rund 130 ccm. Mangel an O_2 führt bei Crustaceen bald zum Tod (Bunge). Bei Luftatmung wird der O_2-Verbrauch herabgesetzt, da die Atmungsorgane der Krebse für die Luftatmung unzulänglich sind (Brunow 1911). Erhöhter O_2-Druck beschleunigt die Stoffwechselvorgänge nicht (Henze 1910). Bei Decapoden wurde ein RQ von 0,8 gefunden. Schalenbildende Tiere speichern gebunden an Ca oft große Mengen von CO_2 auf, weshalb nur die Werte für den O_2-Verbrauch als verläßlich gelten können.

Die Atmung der Mollusken. Jolyet und Regnard fanden bei der Auster pro Kilogramm Tier und Stunde 13,4 ccm O_2-Verbrauch, einen Wert, der ähnlich dem ist, der bei anderen Muscheln gefunden wurde. Es dürfte wohl schwer sein, die Wirkung der Bakterien und sonstiger Parasiten auzuschalten. Da die Flüssigkeit, die bei Muscheln aus den abgeschnittenen Kiemen und Fühlern ausfließt, Guajaktinktur bläut, ist anzunehmen, daß diese auch im Körper als Sauerstoffüberträger wirkt. An Mollusken stellte Vernon (1897) Untersuchungen an (bei Tethys, Pterotrachea, Helix u. a.) und fand RQ von 0,74 bis 0,79. Bedeutungsvoll scheinen die Beobachtungen Thunbergs bei Limax und zwar besonders darum, weil aus seinen Versuchen eine weitgehende Abhängigkeit der Oxydationsvorgänge von der Höhe der zugeführten Sauerstoffmenge hervorgeht. Dieser Befund hat jedoch insofern keine Bestätigung erfahren, als durch Henze (1910) nachgewiesen wurde, daß bei Aplysia und bei Cephalopoden unter höherem Sauerstoffdruck keine Steigerung der Verbrennungsvorgänge eintritt. Ein Absinken der Oxydationsvorgänge wurde von ihm unter verminderter Sauerstoffzufuhr allerdings beobachtet, doch kann dies ganz mit jenen Erscheinungen in Parallele gestellt werden, die man auch bei höheren Tieren im Gefolge von Sauerstoffmangel sieht und die zur Asphyxie führen. Bei Oktopus wurde ein Sauerstoffverbrauch von 44 ccm pro Kilogramm und Stunde (Jolyet und Reguard) gefunden. Temperaturerhöhung führt auch bei diesen Tieren zu einer Zunahme des Gaswechsels. Ueber die Atmung von Echinodermen liegen Beobachtungen von Winterstein und Pütter vor. An Eiern von Arbacia pustulosa wies Warburg (1908) nach, daß nach der Befruchtung der O_2-Verbrauch auf das Siebenfache erhöht war. Im Hinblick auf die Untersuchungen von J. Loeb ist es jedenfalls auch bemerkenswert, daß durch die Einwirkung schwach hypertonischer Lösungen eine ähnliche Steigerung zu erzielen ist.

Von Würmern sind besonders Ascaris und Lumbricus wie Hirudo vielfach auf den Gaswechsel untersucht worden. 100 g Ascaris produzieren pro Tag 0,38 g CO_2 bei Wasserstoffatmung, und 0,54 g bei Luftatmung (Weinland). Die Höhe der Verbrennungsvorgänge steigt mit der Temperatur. 30 % CO_2 in der Inspirationsluft schädigte Regenwürmer noch nicht, ja sogar reine CO_2 wird von diesen noch geraume Zeit vertragen. Unter vermindertem Luftdruck vermindert sich auch die CO_2-Abgabe und der O_2-Verbrauch anfänglich proportional der Abnahme des Druckes, ist jedoch der Druck auf Werte unter 100 mm Hg gesunken, so steigt die CO_2-Abgabe wieder an, während der O_2-Verbrauch weiter sinkt, ja bei weiterer Druckverminderung kann die CO_2-Produktion wieder dieselbe Höhe, wie bei normalem Barometerstand erreichen. Begreiflicherweise ändert sich damit der RQ, der 1 übersteigt und bis auf 3 anwächst (Konopacki 1907). Da während der Erholung der Tiere nach Sauerstoffzufuhr der RQ immer noch sehr hoch bleibt (Lesser 1910), können die anoxybiotisch produzierten

Zwischenstufen nicht sofort nach der Sauerstoffzufuhr wieder oxydiert werden. Es geht aus den Beobachtungen hervor, daß die Tiere anoxybiotisch und oxybiotisch leben können, und daß von bestimmter niederer O_2-Zufuhr an der anoxybiotische Umsatz in den Vordergrund tritt. Eine Steigerung der Verbrennungsvorgänge bei erhöhter Sauerstoffzufuhr, wie sie Thunberg (1905) ableitete, ist für Lumbricus nicht als erwiesen anzusehen. In den Versuchen von Konopacki war eine solche Zunahme nicht zu beobachten.

Blutegel scheiden beträchtliche Mengen von NH_3 aus und zwar bei Anoxybiose weniger als bei Oxybiose. Ihr Gaswechsel ist durch die Temperatur zu beeinflussen. Cnidarien wurden von Vernon auf ihren Gaswechsel untersucht, auch bei ihnen wurde der Einfluß der Temperatur erwiesen. Pro Kilogramm und Stunde war ihre Sauerstoffaufnahme 5,7 bis 12,7 mg O_2. Spongien bedürfen lebhafter Erneuerung des Wassers, müssen also einen nicht unbeträchtlichen Gaswechsel besitzen, dieser ist derzeit noch nicht gekannt. Auch über Protozoen liegen nur wenige Angaben vor, aus denen man etwas über den Gaswechsel erfährt. Vernon fand bei Collozoon, einem Radiolar, 11,1 mg O_2-Aufnahme pro Kilo und Stunde. Der RQ betrug 1,06. Bei Paramäcien wurden durch Barrat eine CO_2-Produktion von 1,3—5,3 Gewichtsprozent des Tieres in 24 Stunden gefunden. Manche Protozoen, die gewöhnlich nicht anoxybiotisch leben, sind gegen geringe Zunahme des O_2-Druckes sehr empfindlich und werden durch diese geschädigt (Engelmann, Pütter).

Literatur. ***Stoklasa,*** *Methoden zur Bestimmung der Exkrete bei der Atmung der Bakterienzelle, Abderhalden, Handb. III, S. 516.* — ***Henze,*** *Untersuch. an Seetieren. Ebenda S. 1064.* — ***Schenk,*** *Die Atembewegungen, Tigerstedt, Handb. d. phys. Meth. II/2, S. 1.* — ***Tigerstedt,*** *Respirationsapparate. Ebenda I/3, S. 71.* — ***Müller,*** *Biologische Gasanalyse, Abderhaldlen, Handb, III, S. 555,* — ***Johansson,*** *Methodik des Energiewechsels. Ebenda III, S. 114.* — ***Battelli und Stern,*** *Atmung tierischer Gewebe. Ebenda III, S. 444.* — ***Baglioni,*** *Stoffwechsel überlebender Organe. Ebenda III, S. 359.* — ***Barcroft,*** *Blutgaswechsel, Ergebnisse der Phys. VII, S. 699.* — ***Lesser,*** *Das Leben ohne Sauerstoff. Ebenda VIII, S. 742.* — ***Baglioni,*** *Vergleichende Physiologie der Atmung der Wirbeltiere. Ebenda IX, S. 90.* — ***Weinland,*** *Stoffwechsel der Wirbellosen, Oppenheimers Handb. IV/2, S. 446.* — ***Cronheim,*** *Stoffwechsel der kaltblütigen Wirbeltiere. Ebenda S. 401.* — ***Du Bois Reymond,*** *Die Mechanik der Atmung. Ergebn. d. Phys. I/2, S. 377.* — ***A. Loewy,*** *Die Gase des Körpers und der Gaswechsel, Oppenheimers Handb. IV, S. 1.* — ***Bohr,*** *Die Blutgase und der respiratorische Gaswechsel, Nagels Handb. I, S. 54.* — ***Jaquet,*** *Der respiratorische Gaswechsel. Ergebnisse der Phys. II/1, S. 457.* — ***Zuntz, Loewy, Müller und Caspari,*** *Höhenklima und Bergwanderungen in ihrer Wirkung auf den Menschen, Bong. 1906.* — ***Durig,*** *Ergebnisse der Monte Rosa Exp. v. J. 1906. Denkschr. d. Wiener Akad. Bd. 86, 1908 bis 1911 (Erhaltungsumsatz, Atemmechanik).* ***L. Zuntz,*** *Stoffaustausch zwischen Mutter und Frucht. Ergebn. d. Phys. VII, S. 403.* — ***Merzbacher,*** *Der Winterschlaf. Ebenda III/2, S. 214.* — ***Atwater,*** *Versuche über Stoff- und Kraftwechsel. Ebenda III, S. 497.* — ***H. Borruttau,*** *Innervation der Atmung. Ebenda I/2, S. 403 und Nagels Handb. I, S. 1.* — ***Schenck,*** *Innervation der Atmung. Ergebn. d. Phys. VII, S. 65.* — ***H. Boruttau,*** *Das Atemzentrum. Ebenda III/2, S. 89.* — ***Siefert,*** *Ueber die Atmung der Reptilien und Vögel, Pflügers Arch., Bd. 64, S. 361.*

Im Voranstehenden sind nur zusammenfassende Abhandlungen aus der neuesten Literatur angeführt, die den einschlägigen Stoff ausführlich behandeln. An der Hand dieser Aufsätze ist es leicht, die vorliegende Literatur zu übersehen. Neuere Arbeiten (bis zum Sommer 1911) wurden im Text mit Jahreszahlen versehen, die es ermöglichen, in jedem Jahresberichte leicht das Zitat über die Originalpublikation zu finden. Erwähnt seien schließlich die geläufigen, weit verbreiteten Lehrbücher der Physiologie, von denen z. B. hervorgehoben seien die Lehrbücher von ***Hermann, Landois-Rosemann*** *(mit vielen Literaturzitaten),* ***Luciani, Tigerstedt, Zuntz und Loewy.***

A. Durig.

Atmung der Pflanzen.

Allgemeine Bemerkungen zum Begriff der Atmung: I. Die Sauerstoffatmung der Pflanzen. 1. Die Atmungsintensität. 2. Methodisches zur Sauerstoffatmung der Pflanzen. 3. Die Beeinflussung der Sauerstoffatmung der Pflanzen durch die äußeren Bedingungen. 4. Die postmortale Kohlensäureproduktion. 5. Die Materialien für die vitale Oxydation in der Sauerstoffatmung. 6. Die Ursachen der vitalen Verbrennung in der Sauerstoffatmung. II. Die anaerobe Atmung.

Allgemeine Bemerkungen zum Begriff der Atmung. So wie verschiedene andere Grundbegriffe der Pflanzenphysiologie, so hat sich auch die Lehre von der Atmung der Pflanzen wesentlich an Erfahrungen und Analogien der Physiologie der höheren Wirbeltiere herangebildet. Die Atmungsvorgänge an dem gewöhnlich zu Experimenten verwendeten Pflanzenmaterial, wie an keimenden Samen oder Pilzen, stimmen in der Tat in allen wesentlichen Charakteren mit der Wirbeltieratmung überein. Hier wie dort handelt es sich um Vorgänge an lebenden Zellen, und die physiologische Erfahrung zeigt, daß sie wie bei Pflanzen so bei Tieren im Dienste der Energiegewinnung zur Aufrechterhaltung des Betriebes der Lebenserscheinungen stehen. Das vergleichend

chemische Studium aller dieser Atmungsprozesse lehrt, daß hierbei stets freier Sauerstoff aus dem umgebenden Medium, Luft oder Wasser, aufgenommen wird und dem Verbrauche in dem lebenden Organismus anheimfällt. Als Hauptprodukte des chemischen Umsatzes werden aber Kohlensäure und Wasser nach außen hin abgegeben. Hier wie dort bilden Kohlenstoffverbindungen das Material dieser vitalen Oxydationen, und Fette und Kohlenhydrate spielen weitaus die wichtigste Rolle bei der Unterhaltung der Atmung. Ja selbst die Entwickelung freier Wärme ist kein Vorgang, der auf die atmenden warmblütigen höheren Wirbeltiere beschränkt ist, denn man kann unter Benützung geeigneter Methoden ohne Schwierigkeit bei jeder atmenden Pflanze die Wärmeentwickelung nachweisen. Nur die Einrichtungen zur Konstanthaltung der Körpertemperatur sind den warmblütigen Wirbeltieren eigentümlich.

Trotzdem ist es schwer den Begriff der Pflanzenatmung in strenger Parallele mit der tierischen Atmung zu halten. Schon die Einschränkung des Atmungsbegriffes auf Vorgänge an lebenden Zellen stößt auf Schwierigkeiten, indem ziemlich allgemein Pflanzenorgane auch im abgetöteten Zustande Kohlensäure ausscheiden, sei es, daß sie im Mörser zu Brei zerrieben wurden, oder daß sie unzerkleinert, unter Bedingungen, die Bakterien ausschließen, aufbewahrt werden. Man kennt gegenwärtig analoge Vorgänge ebenso von tierischen Geweben. Auch das zweite prinzipielle Merkmal der Pflanzenatmung, daß alle vitalen Oxydationsvorgänge der Gewinnung von Betriebsenergie dienen, ist nicht absolut scharf, da es Oxydationen in der lebenden Zelle gibt, die als Quelle von Betriebsenergie nicht wesentlich ins Gewicht fallen. Es muß ferner die Atmung auch nicht immer mit Kohlensäureausscheidung verbunden sein, sondern die Atmungsprodukte können ganz anderer Natur sein. Der Zerfall des Zuckers in der Alkoholgärung der Hefe vereinigt wiederum alle Merkmale der Atmung mit der einzigen auffallenden Ausnahme, daß dabei keine Sauerstoffaufnahme und Oxydation stattfindet. Endlich kann sich die vitale Oxydation in der Pflanzenatmung auf Materialien erstrecken, die die Atmung höherer Lebewesen absolut nicht unterhalten können. Die Salpeterbildung aus Ammoniak oder die Oxydation des Schwefelwasserstoffes durch Bakterien sind typische vitale Oxydationen im Dienste der Gewinnung von Betriebsenergie, die nur in dem einen Punkte von der Wirbeltieratmung weit abweichen, daß hier inorganische Materialien verarbeitet werden.

Stellt man bei der Behandlung des Atmungsproblems in der Pflanzenphysiologie den chemischen Standpunkt in den Vordergrund, so gelingt es bis zu einem gewissen Grade der Schwierigkeiten dadurch Herr zu werden, daß man die Bezeichnung „Atmung" ganz vermeidet und die betreffenden Lebenserscheinungen als „Sauerstoffresorption" zusammenfaßt. Dabei sieht man ganz davon ab, ob gleichzeitig Kohlensäure produziert wird oder nicht. Gleichzeitig erzielt man den Fortschritt, daß man nicht nur solche Lebensprozesse berücksichtigt, die durch die Aufnahme des freien Luftsauerstoffes unterhalten werden, sondern auch jene Vorgänge, die in der vitalen Reduktion von verschiedenen inorganischen und organischen Sauerstoffverbindungen bestehen und in ihrer physiologischen Bedeutung den Oxydationsvorgängen durch den freien Luftsauerstoff im Organismus größtenteils entsprechen. So habe ich vorgeschlagen, die Vorgänge der Sauerstoffresorption in die „Luftatmung" und die „Reduktionsatmung" zu gliedern. Leider fallen Prozesse, wie die Alkoholgärung, die mit der Atmung in engem physiologischen Zusammenhange stehen, überhaupt außerhalb des Rahmens der Sauerstoffresorption.

Nimmt man mit Pfeffer die physiologischen Gesichtspunkte als das leitende Moment in der Behandlung des Atmungsproblems an, was ich für den richtigsten Vorgang halte, so ist unbedingt daran festzuhalten, daß zwischen allen den verwirrend mannigfachen Atmungsprozessen nur die Gewinnung von Betriebsenergie das einigende Band darstellt. Aus diesem Heere von Vorgängen hebt sich die Sauerstoffatmung als weitverbreiteter Typus ab, der charakteristisch in der vitalen Oxydation von Kohlenhydraten, Fetten und anderen organischen komplexen Verbindungen unter Zutritt des atmosphärischen Sauerstoffes besteht, und bei den höheren Pflanzen und Tieren wohl wesensgleich ist. Organismen, die ohne Darbietung des atmosphärischen Sauerstoffes nicht zu leben imstande sind, werden als obligate Aerobionten bezeichnet.

Als Gruppenbezeichnung von Vorgängen, die im Dienste der Gewinnung von Betriebsenergie stehen, kann selbst der alte Begriff der Gärungen noch herangezogen werden. Man hätte darunter Prozesse zu verstehen, bei denen massenhafter Umsatz einer bestimmten Substanz stattfindet, ohne daß es den betreffenden Organismen hierbei auf etwas anderes ankäme, als sich die bei dem Umsatze freiwerdende Energiemenge zunutze zu machen. Die Umsatzprodukte selbst werden in der Regel zum allergrößten Teile unbenützt gelassen. Bei den Gärungen spielt auch die Aufnahme freien Sauerstofes keine wesentliche Rolle. Immerhin

ist mit der Betonung der Gewinnung von Betriebsenergie durch die Atmungsvorgänge der ursprüngliche Charakter des Atmungsbegriffes so stark verschoben, daß man es begreiflich findet, wenn manche Forscher, wie Barnes, auch von dieser Seite den Begriff „Atmung“ ganz aufgegeben haben, und nur von Betriebsstoffwechsel oder Energesis sprechen.

I. Die Sauerstoffatmung der Pflanzen.

1. Die Atmungsintensität. Die Sauerstoffatmung darf deswegen, weil die Pflanzen nicht zu den Lebewesen mit konstanter höherer Körpertemperatur gehören, hinsichtlich ihrer Intensität nicht unterschätzt werden. Die pflanzlichen Kleinwesen, wie auch die niederen Pilze, die meist ein enormes Vermehrungs- und Wachstumsvermögen besitzen, scheiden im Verhältnis zu ihrer Körpermasse oft 6 bis 20 mal so viel Kohlensäure aus, wie der Mensch und die warmblütigen Wirbeltiere. Selbst keimende Samen atmen nicht viel weniger lebhaft als der Mensch, indem sie innerhalb von 24 Stunden fast 1 % ihres Frischgewichtes an Kohlensäure erzeugen, während der Mensch ungefähr 1,2 % seines Lebendgewichtes in derselben Zeit an Kohlensäure ausatmet. Dabei ist die Körperwärme der pflanzlichen Organismen in der Regel von der Temperatur ihrer Umgebung nicht sehr verschieden, so daß die Intensität der Sauerstoffatmung in keinem direkten Zusammenhange mit einer höheren Körpertemperatur zu stehen braucht.

Bei keimenden Samen vermag man ohne Schwierigkeit bei genauer Verfolgung der Atmungsintensität während des Fortschreitens der Entwickelung zu konstatieren, daß die Atmungsintensität mit der Intensität des Längenwachstums zunimmt, ihren höchsten Betrag dann erhält, wenn das Längenwachstum am lebhaftesten ist, und dann mit der Abnahme des Längenwachstums der Keimlinge wieder abklingt. Diese Zunahme und Wiederabnahme des Längenwachstums während der Entwickelung der jungen Pflanze bezeichnet man als die große Periode des Wachstums. Geradeso kann man auch von einer großen Periode in der Sauerstoffatmung während der Individualentwickelung sprechen.

Die Blätter der entwickelten Pflanze atmen nach neueren Feststellungen gleichfalls sehr intensiv. Doch überwiegt der durch die Chlorophylltätigkeit im Sonnenlichte verursachte Gaswechsel, Sauerstoffausscheidung und Kohlensäurebindung, den Atmungsgaswechsel im Lichte so bedeutend, daß die grünen Pflanzen im Sonnenlichte eine namhafte Mehrproduktion an Sauerstoff aufweisen. Dieser Umstand hat lange Zeit hindurch das Durchdringen der richtigen Auffassung der Pflanzenatmung als einer ununterbrochenen fortdauernden Lebenserscheinung, die allen Gewächsen eigen ist, verhindert. Blüten zeigen ebenfalls lebhafte Atmungsfähigkeit. In auffallender Weise steigt die Atmung des Fruchtknotens nach erfolgter Bestäubung der Narbe.

Bei gequollenen Samen atmet der Embryo vielmal stärker als das Samennährgewebe. Daß aber auch ruhende Samen meßbare Mengen von Kohlensäure ausscheiden, ist durch eine Reihe von Untersuchungen erwiesen worden. Die Atmungstätigkeit der Samen nimmt mit steigendem Wassergehalte der Samen beträchtlich zu. Während 1 kg Getreidekörner von 9 % Wassergehalt in 4 Monaten nur 0,07 bis 0,12 g Kohlensäure ausschied, wurde von Getreidekörnern, die 33 % Wasser enthielten, schon in 24 Stunden 0,2 g Kohlensäure produziert.

Während der Winterruhe ist die Atmung der Zweige unserer Holzgewächse deutlich schwächer als während der Zeit der vollen Vegetationstätigkeit. Doch ist die Schwächung nicht so bedeutend wie man denken könnte, und beläuft sich auf eine Herabsetzung des Maximalbetrages um ungefähr 1/3.

2. Methodisches zur Sauerstoffatmung der Pflanzen. Um die Kohlensäureausscheidung durch Pflanzen in einem Demonstrationsversuche einfach nachzuweisen, empfiehlt es sich, keimende Samen oder ein anderes geeignetes Material locker gehäuft in einen Glaskolben zu bringen, und diesen Glaskolben mit einem doppelt durchbohrten Stopfen zu verschließen. Man verbindet wie die nebenstehende Abbildung (Fig. 1) zeigt, das Keimlingsgefäß mittels

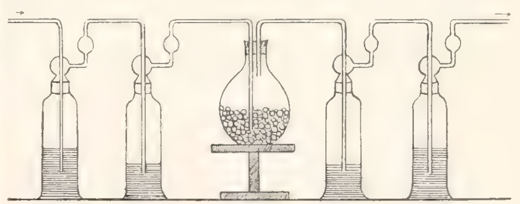


Fig. 1.

Glasröhren jederseits mit zwei Gaswaschflaschen. Das eine Flaschenpaar dient zur Untersuchung der zugeleiteten Luft, das andere zur Prüfung der durch die atmenden Keimlinge veränderten Luft, und wird mit der Wasserstrahl- Saugluftpumpe verbunden. Die dem Keimlingsgefäß benachbarten Flaschen werden mit Wasser beschickt, das durch Natriumbikarbonat schwach alkalisch gemacht und durch Zusatz weniger Tropfen alkoholischer Phenolphthaleinlösung rot gefärbt wird. Die beiden anderen Waschflaschen werden mit Barytlauge gefüllt.

Wenn nun ein langsamer Luftstrom durch den Apparat hindurchgesaugt wird, so sieht man in den zwischen Keimlingsgefäß und Luftpumpe eingeschalteten beiden Waschgefäßen die Lösungen sich sehr bald verändern: die alkalische Phenolphthaleinlösung wird entfärbt, und in der Barytlösung scheidet sich rasch ein dichter Niederschlag von kohlensaurem Baryt aus. Die Lösungen in den beiden anderen Flaschen bleiben so gut wie unverändert.

Um den Verbrauch von Sauerstoff in der Pflanzenatmung zu zeigen, benützt man gewöhnlich die Erscheinung, daß atmende Pflanzen ein eingeschlossenes Luftvolumen stark vermindern, falls man dafür Sorge trägt, daß die entwickelte Kohlensäure sofort durch Alkalilauge absorbiert wird. Ich bringe das Keimlingsmaterial in ein Exsikkatorgefäß, das mit einem aufgeschliffenen Deckel mit Glasrohransatz versehen ist (Fig. 2). Der

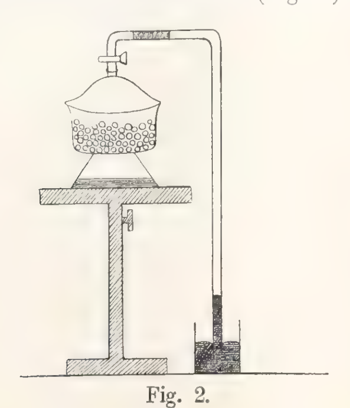


Fig. 2.

Boden des Exsikkatorgefäßes wird mit starker Natriumhydroxydlösung bedeckt, die zur Absorption der gebildeten Kohlensäure bestimmt ist. Die Keimlinge werden auf einer durchlöcherten Scheibe ruhend in dem oberen Teile des Exsikkatorgefäßes angebracht. Das an den Exsikkator angesetzte Glasrohr ist zweimal rechtwinkelig gebogen, und taucht mit seiner Mündung in ein Gefäß mit Quecksilber ein. Wenn der Versuch im Gange ist, so steigt das Quecksilber im Rohre rasch auf, besonders wenn man dafür Sorge trägt, daß die Temperatur im Keimlingsgefäß 25 bis 30 ° beträgt, was durch ein Wasserbad leicht geschehen kann.

Für die quantitative gasometrische Analyse der Atmungsprodukte der Pflanzen ist der zweckmäßigste unter den gegenwärtig existierenden Apparaten unstreitig die von A. Richter angegebene Vorrichtung, die jetzt in der von W. Polowzow verbesserten Ausführung in den Laboratorien im Gebrauche steht. Eine Beschreibung dieses Apparates, der auch für die Bestimmung von Wasserstoff, Methan usw. verwendbar ist, kann hier in Kürze kaum gegeben werden. Ich verweise vielmehr auf die im Literaturanhange angeführte Arbeit von Palladin und Kostytschew, die ausführlich über diese wichtige physiologische Untersuchungstechnik orientiert. Daselbst sind auch die älteren Methoden zur Analyse kleiner Mengen von Atmungsgasen näher dargelegt, von denen insbesondere der vielbenützte gasometrische Apparat von Bonnier und Mangin zu nennen ist, der gleichfalls gute Resultate zu gewinnen gestattet.

3. Die Beeinflussung der Sauerstoffatmung der Pflanzen durch die äußeren Bedingungen. Die Temperaturverhältnisse beeinflussen die Atmung der Pflanzen sowie andere Lebenserscheinungen in sehr erheblichem Maße. Solange nicht das Leben der Pflanzen durch niedere Temperaturgrade aufgehoben oder stark geschädigt wird, findet, wie ältere und neuere Beobachtungen gezeigt haben, auch bei Temperaturen von 10 bis 20 ° unter dem Gefrierpunkte noch eine meßbare, wenn auch sehr schwache Ausscheidung von Kohlensäure statt. Wenn sich die Temperatur dem Nullpunkte nähert, so stellt sich eine erhebliche Steigerung der Atmungstätigkeit ein. Kiefernnadeln atmen bei 0 ° bereits 25 mal stärker als bei — 12 °. Bei dem weiteren Ansteigen der Temperatur entspricht die Zunahme der Atmungstätigkeit der Pflanzen in der Regel dem als die van 't Hoffschen Regel bekannten Gesetze der Abhängigkeit der Geschwindigkeit chemischer Reaktionen von der Temperatur. Die Zunahme der Atmungstätigkeit erfolgt proportional der Temperatursteigerung so, daß die Atmung auf den 2,2 bis 3 fachen Betrag ansteigt, wenn die Temperatur um 10 ° wächst. Diese Beziehung wird bis 40 ° meist mit hinreichender Genauigkeit gefunden. Dann tritt jedoch plötzlicher rapider Abfall der Atmungsintensität ein, der mit dem Tode der Pflanze endigt. Von einem sogenannten „Optimum“ der Atmung bei einer bestimmten Temperatur kann sonach nicht gesprochen werden. Diesen allgemeinen Beziehungen zwischen dem Gange der Atmung und der Temperatur ist hinzuzufügen, daß rasche Temperaturschwankungen die Intensität der Atmung vorübergehend energisch beeinflussen, in ähnlicher Weise wie durch eine plötzliche Temperaturschwankung das Wachstum von Pflanzen vorübergehend stark verlangsamt wird.

Der Einfluß von Lichtstrahlen auf die Atmungsintensität bei den Pflanzen ist seit langer Zeit ein viel umstrittenes Gebiet. Ergebnisse, die in bestimmter Weise eine direkte Beeinflussung der Atmung durch

das Licht zeigen würden, liegen bisher nicht vor. Kritische Versuche aus neuerer Zeit scheinen eher darauf hinzuweisen, daß das Licht einen direkten Einfluß auf die Intensität der Atmung nicht besitzt.

Radiumstrahlen haben nach den vorliegenden Experimentaluntersuchungen keine Wirkung auf die Atmung der Pflanzen.

Beschränkung der Sauerstoffzufuhr. Werden höhere Pflanzen unter Bedingungen kultiviert, unter denen im Vergleiche zum normalen Leben an der freien Luft die Sauerstoffzufuhr eingeschränkt ist, so dauert die Atmung ungeschwächt fort, selbst wenn die Sauerstoffpartiärpressung bis auf die Hälfte der normalen Spannung herabgesetzt wurde. Erst wenn die Sauerstoffspannung der umgebenden Luft bis auf $^1/_{10}$ und weniger des normalen Betrages gesunken ist, treten schwere Störungen in der normalen Atmung ein, und es setzen Stoffwechselprozesse ein, die als Ersatz der normalen Sauerstoffatmung zu dienen haben. Auf diese wird noch weiter unten zurückzukommen sein.

Auch sehr sauerstoffreiche Luft äußert auf die Atmung der Pflanzen so wenig schädliche Wirkungen, daß Samen selbst in reinem Sauerstoffgase zur Keimung gelangen. Erst bei einem Luftdrucke von 5 Atmosphären und mehr treten infolge der zu großen Pressung des Sauerstoffes Störungen der Atmung und des Wachstums ein (Sauerstoffstarre). Durch den erhöhten Sauerstoffdruck wird die Intensität der Kohlensäureausscheidung in verschiedener Weise geändert. Je nach den Versuchspflanzen wurde bald eine Vermehrung oder eine Verminderung der ausgeatmeten Kohlensäure gegenüber der Norm konstatiert, Verletzungen der Versuchspflanzen haben einen sehr ausgeprägten Einfluß auf die Intensität der Kohlensäureausscheidung. Man kann wie Böhm zuerst dargetan hat, an zerschnittenen Kartoffelknollen oder Zwiebeln leicht sicherstellen, daß der Atmungswechsel infolge des Verwundungsreizes viel lebhafter wird. Hierbei wird sowohl mehr Sauerstoff aufgenommen, als Kohlensäure abgegeben. Sofort nach Erzeugung der Verletzungen erfolgt ein starker Anstieg der Atmung, der mit der Abscheidung der in den Geweben angesammelten Kohlensäure zusammenhängt, die nun von der stark vergrößerten Organoberfläche entweicht. Der eigentliche Anstieg der Atmung durch den Verwundungsreiz geschieht später und währt mehrere Tage, seinen Höhepunkt erst am 6. oder 7. Tage erreichend. In Verbindung mit der gesteigerten Atmung ist als Folge der Verletzungen auch stets eine erhöhte Wärmeproduktion nachzuweisen.

Von chemischen Reizwirkungen auf die Sauerstoffatmung der Pflanzen ist besonders der Einfluß narkotisch wirkender Stoffe von Interesse. Kleine Mengen von Aetherdampf oder Chloroformdampf erhöhen die Atmung verschiedener Pflanzen sehr energisch. Ueberschreitet man jedoch die Konzentration des Aetherdampfes über ein bestimmtes nicht hoch gelegenes Maß, so tritt eine Herabsetzung der Atmungstätigkeit ein. Den gleichen Effekt der Verminderung der Atmungstätigkeit kann man jedoch auch dadurch erzielen, daß man die anfangs erregend wirkende Aethermenge zu lange Zeit einwirken läßt. Eine Erregung der Atmungstätigkeit läßt sich aber ebenso durch andere Gifte erzielen, wenn man diese in sehr kleinen Dosen anwendet. Es gelingt dies beispielsweise durch Lösungen von Pflanzenalkaloiden, von Antipyrin, von Jod, oder durch Schwermetallsalze. Diese Wirkungen auf die Sauerstoffatmung gehören zu den Teilerscheinungen der allgemeinen Erfahrung, daß Gifte in kleinsten Konzentrationen allgemein als physiologische Erregungsmittel wirken. Erst bei Ueberschreitung einer gewissen Konzentrationsgrenze entfalten alle diese Stoffe ihre charakteristischen toxischen Wirkungen. Bekanntlich benützt man die erregende Wirkung kleiner Mengen von Aetherdampf auf die Sauerstoffatmung und das Wachstum der Pflanzen in der gärtnerischen Praxis als Mittel zum Antreiben des Flieders.

Größere Mengen von Kohlensäure hemmen die Atmung der Pflanzen selbst dann, wenn gleichzeitig reichlich Sauerstoff zur Verfügung steht. Mehr als 5 Volumenprozente an Kohlensäure in der umgebenden Luft sind bereits nachteilig wirksam, jedoch nicht bei grünen Pflanzen am Lichte, weil da der Ueberschuß an Kohlensäure in der Chlorophylltätigkeit verarbeitet wird.

Schließlich muß erwähnt werden, daß bei Pilzen, die in flüssigem Nährsubstrate wachsen, auch osmotische Einflüsse auf die Atmung beobachtet werden. Plötzliche Konzentrationsänderungen der Nährlösung alterieren die Atmungsintensität in der Weise, daß ein Anstieg in der Konzentration der Nährlösung die Atmung hemmt, und eine Konzentrationsherabsetzung die Atmung steigert. So zeigen auch Bohnenkeimlinge, die in konzentrierteren Zuckerlösungen gezogen werden, eine gesteigerte Atmung im Vergleich zu Bohnenpflanzen in verdünnterer Zuckerlösung. Im übrigen hat die Zusammensetzung des Nährsubstrates bei Pilzkulturen einen großen Einfluß auf das Mengenverhältnis der ausgeschiedenen Kohlensäure und des verbrauchten Sauerstoffes, besonders aber auf die Quantität der produzierten Kohlensäure.

4. Die postmortale Kohlensäureproduktion. Eine theoretisch sehr bedeutsame Erscheinung ist die Fortdauer von Ausscheidung von Kohlensäure an abgetötetem Pflanzenmaterial. Meist ist diese postmortale Kohlensäureproduktion viel schwächer als die vitale Ausscheidung von Kohlensäure. Doch kann sie bei durch Hitze getöteten Getreidekörnern selbst intensiver sein als die normale schwache Atmung. Wir dürfen nach dem vorliegenden Tatsachenmaterial nicht mehr daran zweifeln, daß Kohlensäureproduktion und Sauerstoffbindung durch Zellen nach dem Tode sehr verbreitete Erscheinungen sind. Außer der Abtötung durch Hitze ist besonders auch die Tötung ganzer Pflanzen durch Gefrieren und Wiederauftauen bei Gegenwart von Chloroformdampf ein gutes Mittel, um die postmortale Kohlensäureausscheidung an geeignetem Materiale zu studieren. Diese Vorgänge, die übrigens auch in der postmortalen Atmung tierischer Gewebe („akzessorische Atmung" nach Battelli und Stern) ihr Analogon besitzen, sind wohl nicht als eigentliche Sauerstoffatmung zu bezeichnen, weil sie keine geordneten im Dienste der Gewinnung von Betriebsenergie stehenden physiologischen Vorgänge sind. Es ist auch durchaus ungewiß, ob wir in den in der postmortalen Kohlensäureausscheidung zu beobachtenden Vorgängen wirklich erhalten gebliebene Teilerscheinungen der normalen Sauerstoffatmung vor uns haben. Doch deuten manche später zu erwähnenden Umstände darauf hin, daß Rückschlüsse auf normale Atmungsvorgänge aus der „postmortalen Atmung" wohl gestattet sind, vorausgesetzt, daß bestimmte Versuchsbedingungen eingehalten werden.

5. Die Materialien für die vitale Oxydation in der Sauerstoffatmung sind bei den höheren Pflanzen nicht schwer zu erkennen. Während der Vegetationsruhe der Samen, der Knollen und Zwiebeln, sowie während der Winterruhe der Holzpflanzen in deren Zweigen, werden allgemein in großen Mengen Fette oder Kohlehydrate, unter den letzteren besonders häufig Stärke, gespeichert, ebenso wie es mit Fett im Tierreiche vor Eintritt einer Ruheperiode regelmäßig zu geschehen pflegt. Beim Keimen der Samen und Austreiben der Knospen werden diese Stoffe im Verein mit dem energisch einsetzenden Wachstum und der lebhaft werdenden Atmung reichlich verbraucht, ebenso wie es bei entsprechenden Vorgängen im Tierreiche geschieht. Schon Lavoisier und Saussure, die sich zuerst mit der Pflanzenatmung beschäftigten, wurden darauf aufmerksam, daß bei den Pflanzen bemerkenswert oft die Menge der ausgeatmeten Kohlensäure dem Volumen nach übereinstimmt mit dem verbrauchten Sauerstoff. Bei der Atmung der Tiere findet man hingegen bedeutend mehr Sauerstoff dem Volumen nach konsumiert, als Kohlensäure abgegeben wird. Seit Saussure weiß man nun, daß der letzterwähnte Typus des Atmungsgaswechsels bei der Keimung fetthaltiger Pflanzensamen gleichfalls vorkommt, während stärkehaltige Samen ebensoviel Sauerstoff verbrauchen, als sie Kohlensäure abgeben. Dieses Verhalten entspricht vollständig den Ergebnissen bezüglich der Verbrennungsgase bei der vollständigen Verbrennung von Fetten oder Kohlehydraten und Zucker. Bei der Zuckerverbrennung wird ebensoviel Kohlensäure entwickelt wie Sauerstoff verbraucht wird. Bei der Verbrennung der sauerstoffarmen Fette übertrifft die Menge des verbrauchten Sauerstoffes bedeutend jene der entwickelten Kohlensäure. Deshalb ist der Schluß gestattet, daß eine vitale Verbrennung von Kohlenhydraten stattfinde, wenn in der Sauerstoffatmung von Pflanzenorganen das Quantum der produzierten Kohlensäure gleich ist der aufgenommenen Sauerstoffmenge. Hingegen wird bei der Veratmung von Fetten die produzierte Kohlensäuremenge viel kleiner sein müssen als das verbrauchte Sauerstoffvolumen. Das Verhältnis der abgegebenen Kohlensäure zum aufgenommenen Sauerstoff nennt man den respiratorischen Koeffizienten. Er ist dem Gesagten zufolge bei der Veratmung von Kohlenhydraten gleich 1, bei der Veratmung von Fetten kleiner als 1. Allerdings ist nicht zu vergessen, daß der Betrag des respiratorischen Koeffizienten nur die Resultante des Gesamtgaswechsels darstellt, und wir über die unterlaufenden Einzelprozesse aus ihm weiter nichts erfahren können.

Wie ich eingangs bereits bemerkt habe haben die Erfahrungen an niederen Pflanzen gelehrt, daß hier nicht selten Typen von Atmungsvorgängen vorkommen, die sich von der Fett-Kohlenhydrat-Atmung der höheren Organismen weit entfernen. Eklatant tritt die durchgreifende Verschiedenheit besonders bei jenen Atmungstypen hervor, in denen gar keine Kohlenstoffverbindungen verbrannt werden, sondern ganz andere Stoffe aus dem Bereiche der inorganischen Chemie. So gibt es Bakterien, die Schwefelwasserstoff zu Schwefelsäure verbrennen, andere, die Ammoniak zu Salpetersäure oxydieren, ja selbst Formen, die Wasserstoff in der vitalen Oxydation zu Wasser verbrennen. Relativ weit entfernen sich aber auch jene Mikroben vom Atmungstypus der Wirbeltiere und Blütenpflanzen, die an die Veratmung von sehr einfach gebauten Kohlenstoffverbindungen angepaßt sind. Es wurden Mikroben gefunden, die

Methan, Kohlenoxyd, Ameisensäure oder Methylalkohol reichlich verarbeiten, teilweise unter Verhältnissen, die darauf sicher schließen lassen, daß diese Substanzen als hauptsächliches Atmungsmaterial dienen. Diese Stoffe sind sämtlich als Atmungsmaterialien für die höheren Lebewesen nicht geeignet. In allen diesen Fällen handelt es sich aber wie bei der Sauerstoffatmung der höheren Pflanzen um eine totale Verbrennung der betreffenden chemischen Verbindung zu Wasser und Kohlensäure. Nun gibt es weitere mikrobische Atmungstypen, in denen regelmäßig nur eine unvollständige Verbrennung der Atmungsmaterialien unterläuft. Ein bekanntes Beispiel hierfür bieten die Essigbakterien, die verdünnten Aethylalkohol unter Sauerstoffaufnahme zu Essigsäure oxydieren und diese zum größten Teile unverbrannt zurücklassen. Demnach vermag ich von der vollständigen Verbrennung der Fette und Kohlenhydrate im Organismus aller höheren und vieler niederen Pflanzen folgende Atmungstypen zu scheiden, die sämtlich ausschließlich Stoffwechselanpassungen bei Mikroben betreffen: inorganische Atmung, die unvollständige Veratmung von Kohlenstoffverbindungen und die Veratmung einfachster Kohlenstoffverbindungen.

Die inorganische Atmung lernte man zuerst an den merkwürdigen Fadenbakterien aus der Gattung Beggiatoa kennen, die häufig in schwefelwasserstoffhaltigen Quellen leben, und auch an Orten, an denen reichlich organische Zersetzungen in stagnierendem Wasser stattfinden. Diese Bakterien speichern reichlich Schwefel in Körnchenform in ihren Zellen. Zutritt von Luftsauerstoff und Vorhandensein geringer Mengen von Schwefelwasserstoff sind für sie unerläßliche Lebensbedingungen. Kohlensäureproduktion wurde bei diesen Schwefelbakterien noch nicht nachgewiesen. An organischen Nährstoffen bedürfen diese Mikroben nur sehr wenig. Da sich in den Gewässern, in denen Beggiatoen zahlreich leben, stets Sulfate finden, so faßt man den Stoffwechsel der Schwefelbakterien mit Winogradsky in der Weise auf, daß man den Schwefelwasserstoff als Oxydationsmaterial betrachtet, und die Schwefelkörnchen in den Zellen als ein Produkt vitaler Oxydationsvorgänge und als Vorratsstoff für die weitere Verbrennung zu Schwefelsäure ansieht. Das Atmungsendprodukt wäre dann die Schwefelsäure. Die von Nathansohn im Golf von Neapel entdeckten Thiobakterien zeigen manche Analogien; doch scheinen sie außerdem Kohlensäure zu assimilieren. Wenigstens in manchen Fällen hat ferner auch die Ablagerung von Eisenhydroxyd in den Gallerthüllen von Eisenbakterien Beziehungen zur inorganischen Atmung. Es handelt sich dann um die vitale Oxydation des in den eisenhaltigen natürlichen Wässern vorkommenden Ferrokarbonates zu dem Salze des dreiwertigen Eisens. Einen sicheren Fall von inorganischer Atmung stellt schließlich die weitverbreitete mikrobische Oxydation von Ammoniak im natürlichen Boden und in Gewässern dar. Wir wissen seit Winogradskys klassischen Untersuchungen, daß dieser Vorgang dualistischer Natur ist. Gewisse Mikroben, Nitrosomonas und Nitrosococcus genannt, oxydieren das Ammoniak reichlich zu Nitrit und nicht weiter. Nitrobacter hingegen ist ein mit den Nitritbildnern vergesellschaftet lebender Mikrobe, welcher Ammoniak nicht angreift, wohl aber das Nitrit zu Nitrat oxydiert. Dieser Vorgang hat im Kreislaufe der Stoffe eine ungeheure Bedeutung, die man schon daraus ermessen kann, daß die Blütenpflanzen fast allgemein Nitrate bei ihrer Ernährung den Ammoniaksalzen vorziehen, und daher entschieden der Ernährung durch Nitrate angepaßt sind.

Die unvollständige Verbrennung von Kohlenstoffverbindungen in der Sauerstoffatmung der Pflanzen ist in mehrfacher Hinsicht von bedeutendem theoretischen Interesse. Vor allem lernen wir hier Fälle kennen, wo das Atmungsmaterial unter Sauerstoffaufnahme verändert wird, ohne Kohlensäure abzuspalten. Darauf gründet sich die Auffassung, daß die Sauerstoffbindung und die Kohlensäureentwickelung im Atmungsprozesse nicht in direktem gegenseitigen Abhängigkeitsverhältnisse stehen, sondern größtenteils verschiedenen Umsetzungen im chemischen Mechanismus der Atmung entsprechen. Micrococcus oblongus oxydiert Traubenzucker ohne Kohlensäureabspaltung so reichlich zu Glukonsäure, daß man den Vorgang mit der Essiggärung analogisieren und geradezu von Glukonsäuregärung sprechen kann. Das Bacterium aceti bildet ganz ähnlich aus Mannit Fruktose, aus Glykol Glykolsäure. Das „Sorbosebacterium“, Bacterium xylinum, bildet aus Sorbit Sorbose, und aus Glyzerin Dioxyazeton. Solcher Vorgänge gibt es noch eine große Zahl. Alle haben den gemeinsamen Grundzug, daß die Kohlenstoffkette in den als Atmungsmaterialien dienenden Verbindungen intakt bleibt, und gleichzeitig typische Oxydationen unterlaufen.

Einen Schritt weiter gehen die Organismen bei der Bildung organischer Säuren in der Sauerstoffatmung. Traubenzucker läßt sich ohne Zertrümmerung seiner Kohlenstoffkette nur bis zur Glukuronsäure und bis zu der zweibasischen Zuckersäure oxydieren, was auch in der lebenden Zelle stattfindet.

Darüber hinaus führt die Oxydation zum Zerfalle des Zuckermoleküls. Zunächst entstehen Weinsäure und Oxalsäure. Dieser Prozeß findet wahrscheinlich im Pflanzenorganismus häufig ebenso statt, und für viele Fälle ist insbesondere die Herkunft der Oxalsäure, aber auch der Weinsäure aus der unvollständigen vitalen Oxydation des Zuckers sichergestellt, oder mindestens sehr wahrscheinlich gemacht. Allerdings darf nicht vergessen werden, daß Oxalsäure im Stoffwechsel nicht nur aus Zucker entstehen kann, sondern gewiß als intermediäres Stoffwechselprodukt verschiedener biochemischer Vorgänge auftritt. Schimmelpilze bilden aber in Zuckerlösungen oft so reichlich Oxalsäure, daß kein Zweifel über die Natur des Vorganges bestehen kann. Jedoch auch auf reinem Pepton wird so viel Oxalat gebildet, daß die Kulturflüssigkeit beim Einengen zu einem Brei von kristallinischem Ammoniumoxalat erstarrt.

Da nun die Pflanzensäuren sicher häufig im weiteren Gange der Sauerstoffatmung bis zu Kohlensäure und Wasser abgebaut werden, so haben wir hier gute Beispiele von dem in zwei Stufen vor sich gehenden oxydativen Zerfall der Atmungsmaterialien. Die Kohlensäureabspaltung gehört nur dem zweiten Teile des Prozesses an. Einschlägiges Interesse besitzt die Tatsache, daß viele sukkulente Gewächse während der Nachtstunden größere Mengen von organischen Säuren anhäufen, die in den hellen Tagesstunden bei gesteigertem assimilatorischen Kohlensäureverbrauche rasch wieder verschwinden. Das Süßwerden des reifenden Obstes beruht nicht auf einem Uebergange der organischen Säuren in Zucker, wie man früher angenommen hatte, sondern auf einem Verbrauche der Pflanzensäuren in der Sauerstoffatmung unter dauernder Vermehrung des Zuckergehaltes der Früchte.

Von besonderem physiologischen und chemischen Interesse ist die Erscheinung, daß von den beiden optischen Isomeren der Weinsäure, der Milchsäure und der Aepfelsäure nicht beide Antipoden gleich rasch dem oxydativen Zerfalle in der lebenden Zelle anheimfallen, sondern daß eine elektive Verarbeitung unter Rücklassung des allergrößten Teiles der schwierig angreifbaren Modifikation erfolgt. Eine Parallelerscheinung kennt man in der Vergärung optischer Antipoden in der Zuckerreihe, wo z. B. aus einem Gemisch von d-Glukose und l-Glukose jene allein und diese praktisch so wenig verarbeitet wird, daß man die biologische Elektion als Mittel zur Reindarstellung solcher Verbindungen verwenden konnte.

Zur Beurteilung der chemischen Vorgänge, die bei der vollständigen vitalen Verbrennung des Zuckers in der Zellatmung in Betracht kommen, ist die Erkenntnis von der allgemeinen Verbreitung der Alkoholgärung des Zuckers in Luftorganismus bei Einschränkung der Sauerstoffzufuhr von der größten Bedeutung gewesen. Seit Pfeffer auf Grund dieser Erfahrungen 1878 zuerst die weittragende Idee erwog, daß die Alkoholbildung in der sog. „intramolekularen Atmung" mit der Sauerstoffatmung genetisch verknüpft sein könne, haben sich sehr viele zugunsten dieser Auffassung sprechende Tatsachen ergeben. Höchstwahrscheinlich spaltet das Zuckermolekül in der normalen Atmung zunächst ohne Sauerstoffbindung einen Kohlensäurekomplex ab, und die Oxydation setzt erst an einem der Spaltstücke ein. Dabei ist es durchaus nicht nötig, daß Aethylalkohol wirklich auch in der normalen Sauerstoffatmung entsteht. Die Versuche von Palladin und Kostytschew, die in den letzten Jahren bedeutend zur Stützung der Pfefferschen Atmungstheorie beigetragen haben, sprechen sogar dafür, daß Aethylalkohol in der normalen Sauerstoffatmung nicht entsteht. Allerdings ist die Frage der sogenannten intramolekularen Atmung selbst noch recht der Klärung bedürftig. Ursprünglich sollten unter der Benennung „intramolekulare Atmung" alle bei Sauerstoffabschluß vor sich gehenden Vitalprozesse zusammengefaßt werden, die Kohlensäure liefern und als Ersatzprozesse für die unmöglich gewordene Sauerstoffatmung hinsichtlich der Beschaffung von Betriebsenergie dienen. Als sich immer öfter die Gegenwart von kleinen Mengen Aethylalkohol in Pflanzenorganen bei der intramolekularen Atmung ergab, und schließlich auch die Anwesenheit eines Alkohol und Kohlensäure aus Zucker bildenden Enzyms bei intramolekular atmenden höheren Pflanzen konstatiert wurde, das mit der Zymase der Hefe übereinstimmt, schienen die Schranken zwischen den Begriffen intramolekulare Atmung und Alkoholgärung gefallen zu sein. In der Tat haben genaue analytische Feststellungen für eine Reihe von Fällen intramolekular atmender Keimlinge ergeben, daß Kohlensäure und Alkohol in demselben Mengenverhältnisse gebildet werden, wie es die bekannte Gleichung des Zerfalles von Zucker in Alkohol und Kohlensäure verlangt. Jedoch wurde durch die neueren Studien, besonders durch die in Palladins Laboratorium angestellten kritischen Untersuchungen gezeigt, daß als Material für die anaerobe Atmung nicht allein Zucker dienen kann, sondern auch Pepton, und daß voraussichtlich auch Eiweißstoffe dem Zerfall in der intramolekularen Atmung unterliegen können. Die Ausscheidung von Azeton in der intramolekularen Atmung von Keim-

lingen würde gleichfalls eher auf die Verarbeitung von Stoffen, die eine Isopropylgruppe enthalten, wie Leucin, hindeuten, als auf einen anaeroben Zuckerzerfall. Nach Kostytschew wird ferner in der intramolekularen Atmung von Champignon-Fruchtkörpern sicher kein Alkohol gebildet und Zymase fehlt hier. Es wird sich deshalb empfehlen, intramolekulare Atmung und Alkoholgärung nicht schlechthin als gleichbedeutende physiologische Prozesse anzusehen, wenn auch in zahlreichen Fällen die intramolekulare Atmung der Pflanzen wesentlich in der Alkoholgärung des Zuckers besteht. Will man den älteren Begriff „intramolekulare Atmung“ durch eine modernere Fassung ergänzen, so wäre es höchstens zu empfehlen, die betreffenden Vorgänge als „anaerobe Atmung“ zusammenzufassen.

Von dem biologischen Verhältnisse, in dem die sich vertretenden Prozesse der Sauerstoffatmung und der anaeroben Atmung stehen, kann uns der Vorgang der bakteriellen Eiweißfäulnis ein ungefähres Bild liefern. Bei reichlicher Sauerstoffversorgung wird das Eiweiß von den Bakterien rasch bis zu Ammoniak, Kohlensäure und Wasser abgebaut. Tyrosin und Leucin entstehen nur vorübergehend in kleiner Menge, Indol und Skatol gar nicht. Bei mangelhafter Lüftung verläuft hingegen der Vorgang unter reichlicher Abspaltung von Kohlensäure aus den Aminosäuren, wobei Phenole, Phenolsäuren, Indol, Skatol, Methylmerkaptan als charakteristische Fäulnisprodukte hervorgehen.

Große Lücken weisen die gegenwärtigen Kenntnisse vom Abbau der Fette im Atmungsstoffwechsel auf. Die oxydativen Veränderungen scheinen hier in frühen Stadien einzusetzen. Auch ist die Tatsache bemerkenswert, daß sehr oft im pflanzlichen Stoffwechsel vorübergehend reichlich Zucker und Kohlenhydrate erscheinen, in dem Maße wie das Fett verschwindet, und erst die Kohlenhydrate der vitalen Verbrennung anheimfallen. Ob jedoch die Zuckerbildung immer als intermediäres Stadium der Veratmung von Fett im Pflanzenkörper in Erscheinung treten muß, läßt sich heute nicht sagen.

Daß Eiweißkörper und Aminosäuren durch Pflanzen reichlich veratmet werden, lehrt ohne weiteres ein Ernährungsversuch mit Bakterien oder Pilzen unter Ausschluß der Darreichung von Zucker. Hierbei wird regelmäßig reichlich Ammoniak abgespalten, und die Aminosäuren dürften zunächst in Oxyfettsäuren übergehen. Parallelversuche mit kombinierter Zucker- und Aminosäuredarreichung lehren bei Schimmelpilzen ohne weiteres, wie bedeutend das Wachstum und die Atmung gesteigert werden, wenn man der Aminosäure Zucker hinzufügt. Die Aminopropionsäure wirkt anscheinend am besten von allen anderen untersuchten Aminosäuren. Wenn Eiweißstoffe im Atmungsstoffwechsel zerfallen, so werden immer zyklische Kohlenstoffverbindungen wie Tyrosin, Prolin, Tryptophan zerstört, und man darf daraus den Schluß ziehen, daß auch der Benzolring und der Pyridinring in der vitalen Oxydation aufgespalten werden. Nach den vorliegenden Erfahrungen ist dies in ziemlich weitem Umfange möglich. Aspergillus niger vermag nikotinsaure Salze auszunützen, und ebenso manche Pflanzenalkaloide und Purinbasen.

Die Oxydation einfachster Kohlenstoffverbindungen in der Sauerstoffatmung spielt besonders in den Ernährungsanpassungen der niederen Pflanzenformen eine wichtige Rolle. So wird das Methan, das in der Natur als Produkt der mikrobischen Buttersäuregärung der Kohlenhydrate und in verwandten Prozessen in weiter Verbreitung gebildet wird, von bestimmten Bakterien reichlich verarbeitet. Ebenso sind Methylalkohol und Ameisensäure für bestimmte Spaltpilzformen geeignete Stoffe zur Unterhaltung der Lebensfunktionen. Kohlenoxyd dürfte nach neueren Beobachtungen gleichfalls durch Mikroben verarbeitet werden, und nach Potter ist es nicht unwahrscheinlich, daß selbst Holzkohle, Steinkohle und Torf bakterielle Umsetzungen unter Temperaturerhöhung und Kohlensäureentwickelung erleiden. Vieles auf diesem Gebiete ist allerdings noch unsicher, und es steht besonders noch die Frage offen, wieweit gerade die Atmung bei den bakteriellen Umsetzungen einfachster Kohlenstoffverbindungen eingreift. Aethylalkohol ist bereits als ausgezeichnetes Material für die vitale Verbrennung bekannt. Die Essigbakterien oxydieren diesen Alkohol, solange sie reichen Vorrat davon haben, ohne Kohlensäure abzuspalten bis zur Essigsäure. Sie sind jedoch auch dazu befähigt, die Essigsäure bis zu den Endprodukten der Oxydation, Kohlensäure und Wasser zu verbrennen.

6. Die Ursachen der vitalen Verbrennung in der Sauerstoffatmung aufzuklären, stößt heute noch auf große Schwierigkeiten. Nur wenige jener Stoffe, die im Pflanzenkörper bei gewöhnlicher Temperatur leicht und reichlich bis zu den Endprodukten jeder Verbrennung kohlenstoffhaltiger Substanzen zerfallen, neigen außerhalb der lebenden Zelle dazu ohne Anwendung hoher Temperatur oder energischer chemischer Mittel durch die Einwirkung des atmosphärischen Sauerstoffes in Kohlensäure und Wasser zu zerfallen, ja selbst ganz geringe Oxydation zu erleiden. Für die Chemie waren die Versuche von Döbereiner (1828) ein wichtiger Ausgangspunkt für die

Erforschung der Oxydationen bei niedriger Temperatur. Die Physiologie verdankt dem Scharfblicke Schoenbeins die ersten Anregungen zur Erforschung der Oxydationsmechanismen in lebenden Zellen. Sowie die Verbrennung von Alkohol zu Essigsäure oder die Verbrennung von Schwefeldioxyd zu Schwefelsäure durch feinverteiltes Platin ohne Temperaturerhöhung relativ rasch eingeleitet werden kann, so finden sich auch in den lebenden Zellen allgemein verbreitete Stoffe, die analog dem Platinmohr „katalytisch" Oxydationsvorgänge stark beschleunigen. Schoenbein machte zuerst auf eine solche Substanz im Gewebe von Hutpilzen aufmerksam, die für die rasche Bläuung der Bruchflächen mancher Boletusarten verantwortlich zu machen ist. Die als Ursache der Blaufärbung anzusehende Substanz ist nach neueren Erfahrungen ein phenolartiger aromatischer Stoff, das Boletol. Sie läßt sich leicht durch Alkohol in Lösung bringen, und liefert haltbare Lösungen, die sich an der Luft nicht von selbst bläuen. Wohl aber gibt das Boletol mit Oxydationsmitteln, wie Superoxyden blaue Farbenreaktionen. Offenbar ist außer dem Boletol im Gewebe des Pilzes noch ein Stoff enthalten, der den inorganischen Oxydationsmitteln analog wirkt, und „den Sauerstoff auf das oxydable Boletol überträgt". Dieser Stoff ist in Wasser löslich, verliert seine Wirksamkeit durch Erhitzen der Lösung auf 100°, und verhält sich in jeder Richtung wie ein Enzym. Wir haben daher ein Recht, hier von einem Oxydationsenzym oder einer Oxydase zu sprechen. Oxydasen, die sich ähnlich verhalten wie das genannte Pilzenzym, sind in den meisten Pflanzenorganen vorhanden. Zu ihrem Nachweise ist eine Emulsion von Guajakharz geeignet, die durch die Oxydation der in diesem Harze enthaltenen Guajakonsäure rasch blau wird. Viel angewendet wird ferner die Indophenolprobe. Das Indophenolreagens besteht aus einer verdünnten Lösung von 1 Aequivalent α-Naphthol, 1 Aequivalent p-Phenylendiamin und 3 Aequivalente Natriumkarbonat. Es wird durch oxydierende Mittel dunkelblau gefärbt. Das Reagens von Wurster besteht aus einer alkalischen Lösung von Dimethyl- oder von Tetramethyl-p-Phenylendiamin und gibt eine rote Farbenreaktion. Auch eine mit Wasserstoff in statu nascendi entfärbte Lösung von indigsulfosaurem Natron (Indigkarmin) läßt sich zum Oxydasennachweise gebrauchen. Kastles Reagens ist Phenolphthalin in alkalischer Lösung, das zu Phenolphthalein oxydiert wird. Andere Reagentien sind das „Ursol D", das Blaufärbung gibt, und das Pyramidon. Spezielles Interesse hat die Untersuchung der fermentativen Oxydation von Tyrosin, das oft braune, als Melanine bezeichnete Pigmente bei der Oxydation gibt, oder wenigstens aufhört, die Millonsche Probe zu liefern, unter Auftreten einer starken reduzierenden Wirkung auf ammoniakalische Silberlösung.

Mit Ausnahme des Tyrosin zielen alle die genannten Reagentien nur auf einen einzigen Oxydasentypus hin, der meist als Phenolase oder Laccase bezeichnet wird. Bertrand entdeckte das von ihm als Laccase bezeichnete Enzym im Milchsafte des japanischen Lackbaumes, Rhus vernicifera, wo es als die Ursache der rasch eintretenden Dunkelfärbung des Milchsaftes an der Luft zu betrachten ist. Laccaseartige Enzyme sind nun meist verbreitet in Blättern, Sprossen, Wurzeln und unterirdischen Reservestoffbehältern der höheren Pflanzen, weniger in Blüten und Früchten. Nur in säurereichen Organen scheinen sie nicht vorzukommen. Da eine Reihe von inorganischen Oxydationsmitteln auf Guajakemulsion und andere Oxydasenreagentien gleichfalls wirken, so ist es in jedem Falle nötig, die Existenz einer Laccase durch die Probe auf Kochfestigkeit zu bestätigen. Nur die beim Kochen unbeständigen oxydierenden Stoffe können den Phenolasen zugerechnet werden. Interessant ist das Vorkommen von Mangan in der Asche von Phenolasepräparaten. Wegen der energisch oxydierenden Wirkung der Manganverbindungen darf man wohl annehmen, daß in diesen Fällen eine Manganverbindung als „Hilfsstoff" oder Coferment die Wirkung der Laccase unterstützt. Dies ist auch bei der Laccase im Milchsafte des Lackbaumes der Fall.

Die laccaseartigen Oxydationsenzyme bläuen Guajakonsäure für sich allein. Es gibt nun außerordentlich verbreitet enzymartige Stoffe in den Pflanzen, die für sich allein Reaktion nicht bewirken können, wohl aber sofort die Reaktion geben, wenn man etwas Wasserstoffperoxyd hinzufügt. Chodat und Bach, die auf die Wichtigkeit dieser Erscheinung zuerst aufmerksam gemacht haben, unterschieden solche Oxydationsenzyme als Peroxydasen. Sie alle haben ein Peroxyd als Hilfsstoff bei der Sauerstoffübertragung nötig und bekunden ihre Fermentnatur dadurch, daß sie beim Erhitzen unwirksam werden, und daß sie eine streng spezifische Wirkung auf gewisse Stoffe besitzen. Nach den Untersuchungen von Chodat und Bach finden sich die Peroxydasen nur selten allein in Pflanzenzellen, und werden von eigentümlichen hitzeunbeständigen Stoffen begleitet, die selbst in verdünntem Alkohol unlöslich sind und die Eigenschaft haben, im Vereine mit der Peroxydase den Luftsauerstoff unter Bildung von peroxydartigen Verbindungen

aufzunehmen. Dies sind die O x y g e n a s e n. Für alle die genannten Enzyme bestehen noch manche Bedenken. Fast scheint es sicher, daß ihre Wirkungen im Pflanzenorganismus auch von nicht enzymatischen Oxydationskatalysatoren nicht selten ausgeübt werden. Damit kann man jene Fälle erklären, in denen Oxydationswirkungen auch nach Erhitzen des Reaktionsgemisches nicht ausbleiben.

Die auf Tyrosin einwirkende T y r o s i n a s e ist hingegen wohl in allen Fällen zu den echten Enzymen zu zählen. Dieses in Tier- und Pflanzenzellen weit verbreitete Enzym wirkt ohne Coferment, und hat einen entschiedenen Einfluß auf die Bildung von braunen Pigmenten im Organismus. Außer Tyrosin werden noch verschiedene stickstofffreie und stickstoffhaltige zyklische Kohlenstoffverbindungen von der Tyrosinase oxydativ abgebaut. Bei Pflanzen kann man die Melaninbildung namentlich nach dem Absterben der Zellen in Chloroformatmosphäre häufig konstatieren.

Der chemische Mechanismus der Wirkungen der erwähnten oxydierenden Enzyme läßt sich aus dem heutigen Stande der Forschung noch nicht hinreichend verstehen. Man neigt sich derzeit unter dem Eindrucke der chemischen Darlegungen von E n g l e r über die Oxydationsvorgänge und der Studien von C h o d a t und B a c h über das Zusammenwirken von Peroxydasen und Oxygenasen meist zu der Ansicht, daß bei den vitalen Oxydationen zunächst durch Anlagerung des freien molekularen Sauerstoffes Peroxyde als Intermediärprodukte entstehen, die den Sauerstoff an eine geeignete Substanz, den „Acceptor“, weitergeben.

Wenn die Ansicht richtig ist, daß Bildung von Peroxyden und Regeneration der deroxydbildenden Substanz unter Sauerstoffabspaltung mit in den Mechanismus der vitalen Oxydationen gehört, so wäre es nicht ausgeschlossen, daß ein weit verbreiteter Stoff enzymartiger Natur, der energisch Hydroperoxyd in Wasser und Sauerstoff spaltet, mit zu den Enzymen der Atmung gehört. O. L o e w , der zuerst das allgemeine Vorkommen des wasserstoffperoxydspaltenden Enzyms erkannte, nannte das Ferment K a t a l a s e. Katalase fehlt vielleicht keiner lebenden Zelle und es ist eine sehr empfindliche Lücke in unserem Wissen, daß so wenige Anhaltspunkte für eine Theorie von der physiologischen Bedeutung der Katalase sich bisher ergeben haben. Eine Schwierigkeit besteht insbesondere darin, daß Katalase auf organische Peroxyde wirkungslos zu sein scheint, während sie auf Hydroperoxyd so energisch einwirkt. Wasserstoffperoxyd aber ist der herrschenden Auffassung nach in lebenden Zellen nicht vorhanden, so daß man für das allgemeine Vorkommen der Katalase einen rechten Grund nicht anzugeben weiß.

Die erwähnten Atmungsenzyme wirken sämtlich auf aromatische Kohlenstoffverbindungen, Derivate des Benzols, kräftig ein. In auffallendem Gegensatze zu der Reichhaltigkeit dieses Enzymtypus steht die Ergebnislosigkeit der Bemühungen, oxydasische Enzyme aufzufinden, die auf Fette, Kohlenhydrate oder andere physiolgisch wichtige Stoffe aus der Reihe der aliphatischen Kohlenstoffverbindungen ihren Wirkungskreis erstrecken. Sicher den oxydasischen Enzymen zuzurechnen ist die Ursache der Oxydation des Aethylalkohols zu Essigsäure durch die Essigmikroben. Hier ist es bisher B u c h n e r und M e i s e n h e i m e r allerdings nur gelungen „Dauerpräparate“ von abgetöteten Essigbakterien zu erhalten, die Alkohol noch zu oxydieren vermögen, und eine Abtrennung des Enzyms von den Bakterienzellen ist noch nicht durchgeführt worden. In den Preßsaft geht dieses Enzym nicht hinein. Da man aus dem tierischen Stoffwechsel Aldehyd zu Säure oxydierende Enzyme kennt, die A l d e h y d a s e n , so wäre es nicht unmöglich, daß eine Aldehydase auch bei der bakteriellen Essigsäurebildung beteiligt ist. Dann hätte man aber auch an ein Enzym zu denken, das den Aethylalkohol zu Aldehyd oxydiert und mit der Aldehydase gemeinsam tätig ist. Fast gewiß zu erwarten hat man die Aufdeckung pflanzlicher Oxydasen, die die zyklischen Basen aus der Verwandtschaft des Purins oxydieren. Solche Enzyme spielen im tierischen Organismus bei der Entstehung und beim Abbau der Harnsäure eine wichtige Rolle.

Angesichts dieser Sachlage bietet es keine geringen Schwierigkeiten, die Beziehungen von Atmungsenzymen zu der Oxyration von Fetten und Kohlenhydraten zu verstehen. Ein bedeutungsvoller Schritt in dieser Richtung ist erst vor kurzem durch P a l l a d i n unternommen worden. Daß verschiedene Pigmente in Tieren und Pflanzen imstande sind, Sauerstoff locker zu binden und ihn auf anderweitige oxydable Stoffe zu übertragen, weiß man schon lange. Dies betrifft sowohl den roten Blutfarbstoff der Wirbeltiere, als das kupferhaltige blaue Blutpigment mancher Mollusken, das Hämocyanin als auch verschiedene Bakterienpigmente, die in der analogen Weise nach den Untersuchungen von P f e f f e r Sauerstoff locker zu binden vermögen. Sodann ist von weit verbreiteten Pflanzenfarbstoffen vor allem das Karoten, der rotgelbe Farbstoff der Möhrenwurzel und seine Verwandtschaftsgruppe, als eine energisch Sauerstoff aufnehmende Substanz zu nennen. P a l l a d i n

hat nun das Augenmerk darauf gelenkt, daß die bekannte Erscheinung, daß Pflanzen nach dem Absterben eine dunkle Farbe annehmen, gleichfalls mit der Sauerstoffaufnahme durch Farbstoffbildner in Zusammenhang gebracht werden könne. Sehr leicht läßt sich diese postmortale Dunkelfärbung nachweisen, wenn man die Pflanzen in Chloroformdampf in geschlossenen Gefäßen einige Zeit aufbewahrt. Besonders die Milchsaft führenden Pflanzen, viele Tubifloren, Rubiaceen, Compositen, dann Liliaceen und Orchideen zeigen diese Erscheinung. Die in Betracht kommenden Chromogene sind sehr verschiedener Natur; sie gehören jedoch, soweit man sie verfolgt hat, immer in die Reihe der zyklischen Kohlenstoffverbindungen. Auch das Tyrosin sowie das Pflanzenindikan, die Muttersubstanz des Indigofarbstoffes müssen zu diesen „Atmungschromogenen" gezählt werden. Daß bei dieser Pigmentbildung die uns bereits bekannten Oxydasen die maßgebende Rolle spielen, ist wohl nicht zu bezweifeln. Palladins Hypothese geht nun darauf hinaus, daß die Atmungschromogene auch im Leben in den Pflanzengeweben durch die Vermittelung der auf aromatische Stoffe wirksamen Phenolasen und Peroxydasen Sauerstoff binden und ihn an Oxydationsmaterialien so rasch abgeben, daß es zu einer merklichen intravitalen Farbstoffbildung gar nicht kommt. Durch eine solche Hypothese würde die weite Verbreitung von Phenolasen und von aromatischen Chromogenen in den Pflanzengeweben dem Verständnisse näher gebracht werden.

Was mit dem an die Chromogene vorübergehend gebundenen Sauerstoff in der lebenden Zelle weiter geschieht, sagt uns aber auch Palladins Hypothese nicht. Das wichtigste Oxydationsmaterial der lebenden Zelle, die gärungsfähigen Zuckerarten, könnten primär ohne Sauerstoffaufnahme durch zymaseartige Enzyme in Kohlensäure und ein unbekanntes Spaltungsprodukt, welches mit Aethylalkohol meist nicht identisch zu sein scheint, zu zerfallen. Die Oxydation würde erst bei diesem Spaltungskörper einsetzen. Vielleicht entstehen aber organische Säuren, wie Weinsäure, Oxalsäure auf dem Wege über Glukonsäure und Glukuronsäure aus dem Zucker, unter sofortiger Oxydation der endständigen Aldehyd- und Alkoholgruppen. Hier lassen uns die empirischen physiologischen Kenntnisse noch völlig im Stiche. Ebenso ist die vitale Oxydation der Fette noch ein durchaus unberührtes Problem.

II. Die anaerobe Atmung.

Die anaerobe Atmung umfaßt unter diesem, dem ursprünglichen Sinne des Wortes Atmung nach eine contradictio in adjecto darstellenden Titel alle Vorgänge der Beschaffung von Energie zu Zwecken des Betriebes des Zellebens, die ohne Zwischentreten des freien Luftsauerstoffes erfolgen. Im chemischen Sinne laufen sehr viele der anaeroben Atmungsvorgänge auf eine Reduktion von organischen oder auch inorganischen Sauerstoffverbindungen hinaus. Man kann deswegen in diesen Fällen von einer Resorption chemisch gebundenen Sauerstoffes sprechen. Andere anaerobe Atmungsvorgänge, wie der Zerfall des Zuckers in der Alkoholgärung zu Kohlensäure und Alkohol oder die Milchsäuregärung des Zuckers haben mit einer Sauerstoffaufnahme überhaupt nichts zutun, sondern sie vermitteln Energiegewinn durch Spaltung auf nicht oxydativem Wege. Seit Pasteur 1861 die Möglichkeit des anaeroben Lebens zuerst nachgewiesen hat, lernte man sowohl Formen von Lebewesen kennen, die dem „Leben ohne Sauerstoff" strikte angepaßt sind und zugrunde gehen, wenn sie aus einer Kultur unter Abschluß des Sauerstoffes in sauerstofffreiem Medium plötzlich an die normale Atmosphäre gebracht werden, als auch solche, die jederzeit einen Wechsel zwischen sauerstofffreiem bezw. sehr sauerstoffarmem Medium und dem Zutritte von gewöhnlicher Luft vertragen. Jene hat man sich gewöhnt als obligate Anaerobionten zu bezeichnen, diese als fakultativ anaerobische Lebewesen. Die fakultative Anaerobiose wies schon Pasteur für die Hefe nach. Streng obligate Anaerobionten hat man später in den Rauschbrand- und Tetanusbakterien und anderen pathogenen Formen, sowie in Granulobacter butylicum kennen gelernt. In neuerer Zeit wird häufig der Ausdruck „Anoxybiose" statt Anaerobiose gebraucht.

Die Befähigung zum anaeroben Leben erkennt man bei Mikrobenkulturen häufig bereits daran, daß die Bakterien in der ganzen Länge des Impfstiches der Reagensrohrkultur wachsen, und nicht nur an der Oberfläche wie die obligaten Aeroben. Bei Pilzen sieht man Wachstum von untergetauchten Sproßmyzelien als Zeichen anaeroben Wachstums. Die Hefe wächst in manchen Rassen bekanntlich sehr lebhaft am Grunde der Gärbottiche. Im übrigen hat man bei der Prüfung auf Anaerobie dafür zu sorgen, daß die Entwickelung bei möglichst vollständigem Luftabschlusse erfolgt. In vielen Fällen genügt es, den Kulturraum mit Hilfe der Wasserstrahl-Luftpumpe möglichst zu evakuieren und die Luft durch sehr reinen Stickstoff oder Wasserstoff zu ersetzen. Kommt es darauf an, auch Spuren von Sauerstoff längere Zeit hindurch fernzuhalten, so müssen die Kulturen in einer

runden flachen Glaskammer (Fig. 3) angelegt werden, die beiderseits einen Glasrohransatz trägt, der zum Zuschmelzen nach vollzogener Evakuierung mit der Oel-Luftpumpe dient. Bezüglich der Technik anaerober Versuche wie Ersatz des Luftsauerstoffes durch andere indifferente Gase, Verwendung der Luftpumpe zur Entfernung der atmosphärischen Luft aus dem Kulturraume, Kulturgefäße, ferner bezüglich der Untersuchung und des Nachweises der Stoffwechselprodukte im anaeroben Leben, können Einzelheiten nicht in unserer Darstellung Raum finden. Das Wissenswerteste hierüber ist in den im Literaturanhange erwähnten Arbeiten von Palladin und Kostytschew, sowie von Stoklasa enthalten. Um bei Unterrichtsdemonstrationen anschaulich die Möglichkeit des Wachstums von Bakterien in einem äußerst sauerstoffarmen, praktisch sauerstofffreien Medium vorzuführen, fülle ich einen dickwandigen Glaskolben oder eine Druckflasche nach Lintner bis zum oberen Teile des Halses mit Bakteriennährlösung (5% Rohrzucker, 3% Pepton Witte, 1% Fleischextrakt, neutralisiert), impfe mit einem Stückchen der Samenschale von Gartenbohnen oder Puffbohnen, und füge soviel Lösung von Indigkarmin hinzu, daß die Flüssigkeit dunkelblau wird. Nun wird die Flasche mit einem Kautschukstopfen fest verschlossen und bleibt 1 bis 2 Tage lang im Brütschranke bei 25 bis 30 ° stehen. Nach Verlauf dieser Zeit ist das Indigkarmin durch die sich massenhaft entwickelnden anaeroben Bakterien sicher vollständig reduziert und entfärbt. Wenn man den Flascheninhalt sodann langsam in ein Becherglas ausgießt, so färbt sich die Lösung sofort grünlichblau und nach kurzer Zeit dunkelblau durch die Reoxydation an der Luft. Die reichlichen Flocken, die die Lösung trüben, bestehen aus Buttersäuregärungsmikroben.

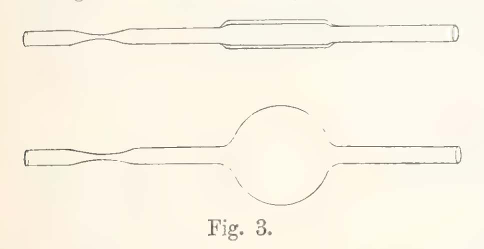


Fig. 3.

Als Reduktionsatmung kann man alle Prozesse zusammenfassen, die zur Energiegewinnung in lebenden Organismen unter Reduktion von sauerstoffhaltigen Verbindungen führen, ohne Bedarf an freiem Luftsauerstoff. Auch hier gibt es eine Veratmung inorganischer Stoffe, sowie eine Reduktionsatmung auf Kosten von organischen Stoffen. Vitale Reduktion inorganischer Stoffe kennt man vor allem von den Bakterien, die Sulfate zu Schwefelwasserstoff reduzieren. Solche Mikroben sind in Grabenschlamm, Aestuarien, überhaupt überall verbreitet, wo reichlich Sulfat unter geringem Luftzutritt dargeboten wird. Andere Mikroben reduzieren im anaeroben Leben Nitrate. Manches spricht dafür, daß Reduktionsenzyme, Reduktasen oder Hydrogenasen, bei den vitalen Reduktionsprozessen als Katalysatoren wirksam sind. Außer Schwefelwasserstoffbildung aus Sulfaten eignet sich auch die Abscheidung von schwarzem kolloidalen Tellur aus tellurigsaurem Salz gut zur Demonstration von vitalen Reduktionsvorgängen bei Mikroben.

Die vitale Reduktion von Kohlenstoffverbindungen läßt sich besonders leicht durch das Hinzufügen von reduzierbaren Farbstoffen, die ungefärbte „Leukoprodukte" liefern, zu Kulturen anaerober Bakterien verfolgen. Da Chloroform oder Toluolzusatz den Entfärbungsvorgang nicht hemmt, so hat man wohl an Reduktionsenzyme zu denken, durch deren Vermittelung die vitale Reduktion geschieht. Unter den in der anaeroben Atmung verwendbaren organischen Verbindungen nimmt der Zucker weitaus den ersten Rang hinsichtlich der Eignung ein, und für viele Mikroben ist das anaerobe Leben an die Darreichung von Zucker eng gebunden. Doch fehlt es nicht an merkwürdigen Stoffwechselanpassungen, in denen sehr einfach gebaute Kohlenstoffverbindungen der vitalen Reduktion anheimfallen. Das Bacterium formicicum vergärt im anaeroben Stoffwechsel reichlich ameisensauren Kalk zu Calciumkarbonat, freier Kohlensäure und Wasserstoff. Man kennt sodann anaerobe Verarbeitung von Milchsäure, Glyzerin und Weinsäure durch Bakterien. Die Zuckerarten werden meist unter so reichlicher Bildung von Buttersäure durch anaerobe Bakterien konsumiert, daß man von Buttersäuregärung zu sprechen pflegt. Die entstehende Säure ist Normalbuttersäure. Doch ist es nicht ausgeschlossen, daß gelegentlich kleine Mengen von Isobuttersäure formiert werden. Die neben Buttersäure reichlich auftretenden gasförmigen Produkte sind Kohlensäure und Wasserstoff. Bei Bakterien ist die Buttersäuregärung des Zuckers weitaus der gewöhnlichste anaerobe Prozeß. An die mikrobische Buttersäuregärung des Zuckers reiht sich direkt die anaerobe Verarbeitung von Kohlenhydraten vor allem der Zellulose, durch Bakterien an. Der primäre Vorgang ist hier jedenfalls die enzymatische Spaltung der Zellulose zu Traubenzucker und daran dürfte sich in der Regel die gewöhnliche Buttersäuregärung anschließen. Doch wurde

durch Omelianski außer der Buttersäure und Wasserstoff liefernden anaeroben Zellulosegärung noch ein zweiter mikrobischer Prozeß aufgedeckt, wo nur wenig Buttersäure, aber viel Essigsäure und Methan entstehen. Bei dieser „Methangärung" der Zellulose dürfte das Methan aus der intermediär gebildeten Essigsäure durch Kohlensäureabspaltung entstehen. Nicht alle Buttersäuregärungsmikroben sind zu der Verarbeitung von Zellulose befähigt. Es gibt ferner eine anaerobe Butylalkoholgärung. Verschiedene Bakterien bilden anaerob aus Zucker oder Glyzerin viel Butylalkohol. Bei höheren Pilzen und bei den Blütenpflanzen scheint Buttersäuregärung des Zuckers gar nicht vorzukommen.

Die zweite Form der anaeroben Atmung besteht in der Gewinnung von Energie für die Vitalprozesse aus Spaltungen komplexer Verbindungen ohne Zwischentreten des freien Luftsauerstoffes. Hier kommen anaerobe Ausnützungen inorganischer Verbindungen gar nicht in Betracht. Ausschließlich organische Verbindungen eignen sich zum anaeroben Umsatze chemischer Energie in andere Energieformen in den pflanzlichen Lebensvorgängen. Unter den organischen Verbindungen, die hier eine Rolle spielen, herrscht die anaerobe Verarbeitung des Zuckers so bedeutend vor, daß die Erforschung der anaeroben Spaltungsatmung anderer Kohlenstoffverbindungen noch sehr wenig in Aufnahme gekommen ist. Die meisten Bakterien, soweit sie nicht zu den Buttersäuremikroben gehören, verarbeiten Zucker anaerob zu Milchsäure. Die Milchsäuregärung ist aber kein obligat anaerober Vorgang, sondern sie tritt sowohl bei Luftzutritt wie bei Luftabschluß ein. Die Milchsäuremikroben sind teils obligat aerob, teils fakultativ anaerob, doch wohl nie obligate Anaerobionten wie die Buttersäuremikroben. Wahrscheinlich spielt bei der Milchsäuregärung ein von den Bakterien produziertes Endoenzym als zuckerspaltendes Agens oder als Katalysator eine Rolle. Wenigstens konnten Buchner und Meisenheimer aus dem Bacillus Delbrückii Leichm. ein Azetondauerpräparat herstellen, das aus Zucker Milchsäure bildete. Auch Herzog konnte über positive Befunde zugunsten eines Milchsäure bildenden intrazellulären Enzyms berichten. Im Pflanzenreiche scheint die Befähigung zur Milchsäuregärung des Zuckers auf die Bakterien eingeschränkt zu sein, während die Milchsäurebildung im tätigen Tiermuskel uns zeigt, daß die Verbreitung dieser Art der Zuckerspaltung bei den Tieren ganz allgemein ist. Doch hat auch hier die Milchsäuregärung nicht den Charakter einer Anpassung zur anaeroben Energiegewinnung, wie es bei den Bakterien so häufig der Fall ist.

Die bis in die neueste Zeit immer wieder behauptete anaerobe Verarbeitung von Mannit durch höhere Pilze, wobei diese Substanz Alkohol, Kohlensäure und Wasserstoff liefern sollte, hat sich in einer genauen Ueberprüfung der Angelegenheit durch Kostytschew als eine Täuschung durch eingedrungene Buttersäuremikroben erwiesen.

Hingegen sind die Blütenpflanzen und die höheren Pilze vielleicht allgemein im anaeroben Stoffwechsel zur Alkoholgärung des Zuckers befähigt. Schon im gewöhnlichen aeroben Leben fehlen kleine Alkoholmengen vielen Pflanzenorganen, wie Früchten, Keimlingen, Baumzweigen, nicht. Bei Luftabschluß ist es relativ sehr leicht, die reichliche Bildung von Alkohol und Kohlensäure durch keimende Samen oder Früchte nachzuweisen. Die eingehenden Ermittelungen von Godlewski und Polszeniusz haben erwiesen, daß die produzierten Gewichtsmengen von Alkohol und Kohlensäure sehr gut den theoretischen Zahlen entsprechen, die sich aus der Alkoholgärungsgleichung berechnen lassen: 100 Kohlensäure und 104,5 Alkohol. Schließlich dürfte nach den Arbeiten von Stoklasa und von Palladin kaum daran zu zweifeln sein, daß die anaerobe Zuckerspaltung in Blütenpflanzen durch eine Zymase vermittelt wird, analog der Alkoholgärung durch Hefe. An der Intensität der Alkoholgärung durch Mucor und andere Pilze mit der Hefegärung ist wohl niemals gezweifelt worden. Ebenso steht es für Mucor fest, daß diese Pilze unbegrenzt lange Zeit unter Sauerstoffabschluß in Zuckerlösung vegetieren können, gerade wie Hefe, und ihren Gesamtbedarf an Betriebsenergie durch die Alkoholgärung decken.

Anders verhält es sich mit den Blütenpflanzen. Früchte und auch keimende Samen können zwar wochenlang unter Sauerstoffabschluß kultiviert werden, ohne daß Absterben eintritt, auf Kosten der intramolekularen Atmung, die wesentlich hier mit Alkoholgärung zusammenfällt. Allein schließlich treten doch Verhältnisse in der Ernährung ein, die dem Leben der Pflanzen ein Ende machen. Man darf also die anaerobe Atmung hier nur als temporären Ersatz der Sauerstoffatmung betrachten, nicht aber als physiologisch vollwertiges Aequivalent des aeroben Lebens, wie etwa bei Hefe. In der Tat ist bei den höheren Gewächsen die Befähigung zur anaeroben Atmung in recht verschiedenem Grade ausgeprägt. Die Plasmaströmung in den Zellen von Chara kann wochenlang unter Abschluß von Sauerstoff andauern, und Sonnenblumenkeimlinge können fast 48 Stunden bei ganz geringen

Sauerstoffspuren noch Wachstum zeigen. Doch stellen Keimlinge von Brassica bei 3 mm Luftdruck das Wachstum völlig ein. Da die Darreichung von Zuckerlösung das anaerobe Wachstum von Keimlingen bedeutend unterstützt, so ist wohl nicht daran zu zweifeln, daß auch hier die Alkoholgärung Betriebsenergie liefert. So dürfte wohl bei höheren Pflanzen in verschieden hohem Maße die Befähigung verbreitet sein, durch Spaltung des Zuckers in Alkohol und Kohlensäure die zum Leben nötige Betriebsenergie wenigstens auf einige Zeit auch ohne Zwischentreten des Luftsauerstoffes durch anaerobe Atmung zu gewinnen.

Literatur. ***W. Pfeffer,*** *Pflanzenphysiologie, II. Aufl., Leipzig 1897, Bd. 1 S. 521.* — ***L. Jost,*** *Vorlesungen über Pflanzenphysiologie, II. Aufl., Jena 1908 S. 218.* — ***F. Czapek,*** *Biochemie der Pflanzen, Jena 1905, Bd. II S. 368.* — *Ueber Oxydasen:* ***Bach,*** *Neuere Arbeiten auf dem Gebiete der pflanzl. und tierischen Oxydasen und Peroxydasen. Biochem. Zentralblatt, Bd. 9 S. 1, 1909.* — ***E. D. Clark,*** *The Plant Oxidases, Dissertation of Columbia University, New York 1910.* — *Atmungsmechanik:* ***W. Palladin,*** *Ueber das Wesen der Pflanzenatmung, Biochemische Zeitschrift, Bd. 18 S. 151, 1909.* — ***F. Czapek,*** *Die Atmung der Pflanzen, Ergebnisse der Physiologie von Asher und Spiro, IX Jahrg. 1910, S. 587.* — *Methodik:* ***W. Palladin und S. Kostytschew,*** *Methoden zur Bestimmung der Atmung der Pflanzen. In Abderhaldens Handbuch der biochem. Arbeitsmethoden, Bd. III S. 479, Berlin-Wien 1910.* — ***J. Stoklasa,*** *Methoden zur Bestimmung der Exkrete bei der Atmung der Bakterienzelle. In Abderhaldens Handbuch der biochemischen Arbeitsmethoden, Bd. III S. 516. 1910.*

F. Czapek.

Atomlehre.

1. Atombegriff. Das Wort Atom (*ἄτομος* unzerschneidbar) bedeutete in früheren Zeiten einen philosophischen Begriff. In die Entwickelung der chemischen Wissenschaft ist dieser vor etwas mehr als 100 Jahren durch John Dalton eingeführt worden und hat dadurch einen definierbaren und dem Fortschritte der Kenntnis entsprechend etwas variablen Inhalt bekommen. Das Wort bezeichnet heute einen Stoffteil von außerordentlich geringer Raumerfüllung, dem bestimmte Eigenschaften zugeschrieben werden, die nur dann vorhanden sind, wenn dieser Teil unverletzt ist, und verschwinden oder sich wesentlich ändern würden, wenn er zerstört würde. Daß eine solche Zerstörung unmöglich sei, war die Voraussetzung der Konzeption dieses Begriffes, die der Tatsache der Unveränderlichkeit gewisser Eigenschaften der Stoffe entsprach. Diese Eigenschaften waren und sind wesentlich mechanischer Natur, und dieser Umstand ist es, welcher die aus philosophischen Gründen stets vorhanden gewesene und in unserer Zeit sich sehr stark betätigende Tendenz begünstigt, alle Naturerscheinungen auf mechanische Erscheinungen zurückzuführen. Die Annahmen über Eigenschaften der Atome erstrecken sich demnach auf ihre räumliche Erscheinung, d. h. ihren äußeren und, in unserer Zeit, auch ihren inneren Bau, auf ihre Konfiguration, d. h. gegenseitige Lage, und ihre Bewegungszustände. Innerer Bau und Bewegungszustand entsprechen wesentlich Erscheinungen, welche in der Physik besprochen werden müssen (Lichterscheinungen, Elektrizität, kinetische Theorie der Gase), dagegen wählt man die Annahmen über äußere Erscheinung und gegenseitige Lage wesentlich im Hinblicke auf chemische Tatsachen. Sehr wesentlich ist bei der ganzen Vorstellung die Annahme der enormen Kleinheit, denn diese führt zu der Folgerung, daß endlich große, sichtbare Stoffstücke aus ungeheuer vielen Atomen zusammengesetzt sind und daher die Regeln der Wahrscheinlichkeitsrechnung Anwendung finden können.

Für die Chemie ist der Atombegriff und der mit ihm aufs engste verknüpfte Begriff der Molekel (vgl. den Artikel „Molekularlehre“) darum sehr wichtig, weil er eine außerordentlich anschauliche Vorstellung („mechanische Erklärung“) grosser Komplexe von Tatsachen und gesetzmäßigen Beziehungen und weiterhin die heuristisch wertvolle und oft erfolgreiche Anwendung des Analogieschlusses zur Entdeckung neuer Beziehungen erlaubt. Die wichtigsten Tatsachen, die man mit Hilfe des Atombegriffes darzustellen pflegt, sind im folgenden behandelt.

2. Die Erhaltung des Stoffes. Bei allen Umwandlungsvorgängen, natürlichen wie künstlichen im Laboratorium und der Technik, bleibt die Gesamtmasse aller beteiligten Stoffe, entstehender wie verschwindender, konstant. Dieser Satz, auch das Gesetz von der Erhaltung der Materie genannt, ist der Ausdruck der Tatsache, daß an einem beliebigen Orte der Erdoberfläche das Totalgewicht der miteinander in Reaktion tretenden Stoffe gleich dem der daraus entstehenden Stoffe ist, falls man den Vorgang in einem völlig geschlossenen Gefäße verlaufen läßt. Denn wenn man das Gewicht durch die von Ort zu Ort wenig aber merklich varie-

rende Gravitationskonstante dividiert, so erhält man, wie die Mechanik lehrt, die von den äußeren Umständen nicht abhängende Größe der Masse.

Die experimentelle Prüfung dieses Fundamentalsatzes erfordert eine sehr subtile Versuchsanordnung und Berücksichtigung von oft sehr wenig geahnten Fehlerquellen. Sie ist in den letzten 20 Jahren durch verschiedene Gelehrte, am sorgfältigsten und ausführlichsten durch Hans Landolt, vorgenommen worden und hat mit der bisher erreichbaren Genauigkeit (etwa 0.00000001 der Gesamtmasse) die Bestätigung ergeben. Zur Demonstration eignen sich besonders Reaktionen, die ohne Gasentwickelung und mit möglichst geringer Temperaturänderung verlaufen und eine Farbänderung oder eine Fällung ergeben. Ein passendes Gefäß zeigt die Figur 1. Es wird von a aus gefüllt,

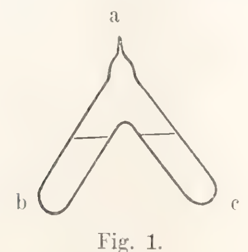


Fig. 1.

je eine Lösung nach b und nach c; dann verschließt man a möglichst dicht (Zuschmelzen), wägt, kehrt das Gefäß um und wägt wieder.

3. Der reine Stoff. Durch die präparative Arbeit langer Zeiten ist ein weiterer wichtiger Begriff begründet worden, der des reinen Stoffes oder des chemischen Individuums. Man kann Stoffe von mehr oder weniger gleichen Eigenschaften auf sehr verschiedenen Wegen erhalten, und je sauberer und sorgfältiger man arbeitet, desto geringer werden die Verschiedenheiten der erhaltenen Endprodukte. So kann man das feste Chlorsilber folgendermaßen gewinnen: 1. Durch Auflösen von Silber oder Silberoxyd in Salpetersäure und Zufügen von Salzsäure oder Chlorkalium oder Eisenchlorid. 2. Durch Verbrennen von Silber in Chlorgas. 3. Durch Glühen von Silberchlorat, wobei Sauerstoff weggeht. 4. Durch Schütteln von festem Silbersulfat mit Kaliumchloridlösung. Die in diesen ausgewählten Beispielen angeführten Reaktionen verlaufen niemals vollständig der Art, daß die Ausgangsstoffe völlig verbraucht werden. Ferner treten „Nebenreaktionen" verschiedenster Art auf, die zu anderen als dem gewünschten Stoffe führen; und die Reste der Ausgangsstoffe, sowie die im Laufe des Vorganges außer dem Chlorsilber entstandenen Stoffe, die durch Hilfsoperationen wie Auswaschen, Filtrieren, Trocknen usw. entfernt werden sollen, lassen sich erfahrungsgemäß nie vollständig so weit entfernen, daß durch kein analytisches Verfahren eine Spur davon mehr nachweisbar bliebe. Das Gleiche gilt von den Ausgangsstoffen, die für jeden dieser Prozesse verwendet werden. Ferner erleiden viele Präparate durch irgendwelche bei ihrer Gewinnung vorgenommene Operationen wesentliche Veränderungen (instabile Stoffe). Demzufolge weichen alle Proben von Chlorsilber mehr oder weniger merklich voneinander ab. Je nach dem Stande der experimentellen Technik lassen sich solche Differenzen verringern, und zwar so weit, daß sie praktisch nicht mehr von Belang sind. Da dieses Ziel sich an verschiedenen Stoffen nicht gleich leicht erreichen läßt, so zeigt die theoretische Betrachtung dieser Verhältnisse wesentliche Unterschiede. Berthollet (um 1800) betonte nachdrücklich die praktische und theoretische Unmöglichkeit der Darstellung eines „völlig reinen" Stoffes, d. h. die Unmöglichkeit, einen Stoff mit völlig gleichen chemischen Eigenschaften nach Belieben zu gewinnen, dagegen vertrat Proust die Anschauung, daß, wenn die Unreinheit praktisch nicht in Betracht kommt, ein Stoff als ideal rein angesehen werden soll. Da die Ansicht Prousts wegen der Häufigkeit der Fälle, in denen sie brauchbar war, sich durchgesetzt hat, so ist man zur Anerkennung des Begriffes vom „chemischen Individuum" gekommen, unter dem man einen solchen „völlig reinen" Stoff versteht. Es darf aber nicht etwa behauptet werden, daß Berthollets Ansicht „falsch" gewesen sei, denn es handelt sich um eine Frage der Zweckmäßigkeit. Hätte die Chemie sich wesentlich mit Harzen und Oelen statt mit Salzen, oder mit Stoffen wie Phosphorwolframsäure statt mit Chlorkalium beschäftigt, so wäre wohl damals wenigstens Berthollet Sieger geblieben. In Fällen, wo es auf hochgradige Reinheit der Stoffe ankam, wie bei den Atomgewichtsbestimmungen (s. u.), ist auch gelegentlich diese klassische Streitfrage wieder erörtert worden, und einer der klarsten Köpfe und der besten Experimentatoren, die die Geschichte der Chemie kennt, Marignac, hat zur Erklärung experimenteller Differenzen sehr mit Recht auf die Unmöglichkeit der Gewinnung „reiner" Stoffe hingewiesen.

4. Das Gesetz der „konstanten" und „multiplen" Proportionen. Jedenfalls gehört dieser Idealbegriff[1]) jetzt zu den wesentlichen Annahmen der Chemie; er verlangt

[1]) Es ist hierbei unter einem „Stoffe" stets ein sogenannter homogener Stoff zu verstehen, d. h. ein solcher, dessen Eigenschaften durch seine ganze Masse hindurch sich gleich bleiben.

mit Notwendigkeit die Anerkennung des Schlusses, daß, wenn ein Objekt als „reiner Stoff“ oder „chemisches Individuum“ betrachtet werden darf, die relativen Mengen der Stoffe, die man erhält, wenn man ihn zerlegt, d. h. in andere Stoffe ohne Hinzutritt fremder Stoffe umwandelt, in einem unveränderlichen für ihn charakteristischen Verhältnisse zueinander stehen. Man nennt diesen Satz das Gesetz der konstanten Proportionen und zieht zu seiner Ergänzung den später zu erörternden Satz von den multiplen Proportionen heran.

Ein Stoff, der in solcher Weise in andere zerlegt werden kann, wird eine chemische Verbindung genannt, die Teilprodukte seine Bestandteile. Man kann die Zerlegung so weit treiben, bis man zu den Elementen kommt (vgl. den Artikel „Chemische Elemente“). Der Satz von den konstanten Proportionen läßt sich dann so aussprechen: „Die Masse einer Verbindung ist gleich der Summe der Massen ihrer Elemente. Die Verhältnisse, nach denen die Elemente die Verbindung bilden, sind konstante, durch kein Mittel veränderliche Grössen. Wenn eine Verbindung aus den Elementen A, B, C in den Verhältnissen a:b:c entsteht, und eine andere aus A, B, D, so gelten für diese die Verhältnisse a:b:d, d. h. für beide besteht zwischen A und B das unveränderliche Verhältnis a:b, gleichgültig, welche Verhältnisse zwischen ihnen und C oder D bestehen. Drückt man alle diese Größen in derselben Einheit aus, etwa in Gramm, so heißt a das Verbindungsgewicht (oder Molargewicht) von A, b das von B, c das von C usw. Statt der Elemente kann man auch Teilverbindungen betrachten (etwa Chlorkalium als Teilverbindung des aus Kalium, Chlor und Sauerstoff bestehenden Kaliumchlorates); dann ist deren Verbindungsgewicht natürlich gleich der Summe der Verbindungsgewichte ihrer Elemente. Mit diesen relativen „Verbindungsgewichten“ treten die Elemente auch in andere Verbindungen ein.

Der Satz von den multiplen Proportionen besagt dagegen, daß ein Element nicht nur mit dem eben charakterisierten Verbindungsgewichte auftreten kann, sondern auch mit einem ganzzahligen Vielfachen davon, und zwar gehört dazu als wesentliche Ergänzung, daß dieser zum einfachen Verbindungsgewichte hinzutretende Faktor eine kleine Zahl ist, also nicht etwa 100 oder 1000, denn dann würde die analytische Genauigkeit nicht mehr ausreichen, um die Zahl festzustellen (etwa zwischen 100 und 101 zu unterscheiden) und somit der Beweis nicht geführt werden können, daß das Zahlenverhältnis ganzzahlig ist. Bei den anorganischen Stoffen handelt es sich meist um Zahlen, die 10 nicht überschreiten.

Der experimentelle Nachweis dieser von T. Bergman, J. B. Richter, J. Dalton, J. H. Wollaston aufgestellten Sätze bildet den Inhalt der umfangreichen Literatur über Bestimmung der Verbindungsgewichte (mit Rücksicht auf die Atomenlehre meist Atomgewichte genannt), deren bedeutendste Autoren J. Berzelius, J. Ch. Galissard de Marignac, J. S. Stas und in der Gegenwart Th. W. Richards sind.

Bevor davon die Rede sein kann, muß noch die zu wählende Einheit definiert werden. Als solche gilt das Verbindungsgewicht eines idealen, nicht existierenden Elementes, das dadurch charakterisiert ist, daß dieses Verbindungsgewicht genau 16mal so klein ist wie das des Sauerstoffes. Diese Zahl ist nahe gleich dem Verbindungsgewicht des Wasserstoffes, das in früheren Zeiten als Einheit gedient hat, die jetzt aber aus praktischen Gründen verlassen worden ist.

5. Bestimmung und Wahl der Verbindungsgewichte. Die Wahl der Bezugseinheit mit Rücksicht auf den Sauerstoff hat ihren Grund darin gehabt, daß dieses Element außerordentlich viele Verbindungen bildet und folglich in sehr vielen Verhältnisbestimmungen auftritt, sowie auch eben dadurch solche Elemente, die nicht gemeinsam in gut zu untersuchenden Verbindungen vorkommen, indirekt aufeinander zu beziehen erlaubt. Die gegenwärtige Grundlage des ganzen Systems der Verbindungsgewichte wird von den Elementen Sauerstoff, Stickstoff, Silber und Chlor gebildet, weil so die genauesten Messungen und Berechnungen ermöglicht werden.

Sauerstoff und Stickstoff. Für den Vergleich zweier Gase gibt es nicht nur die Möglichkeit der Zerlegung (falls sie keine Elemente sind) und quantitativen Analysierung aller ihrer einzelnen Bestandteile, wie das bei festen und flüssigen Stoffen geschehen muß, sondern auch die der Verwertung des auf die Entdeckungen von Boyle, Gay-Lussac, Dalton u. a. begründeten Satzes, daß von verschiedenen Gasen, wenn sie sich im sogenannten idealen Gaszustande befinden, unter gleichem Drucke und gleicher Temperatur gleiche Volumina solche Mengen enthalten, daß diese genau im Verhältnisse der Verbindungsgewichte stehen (Prinzip von Avogadro). Man kann demnach das Verhältnis von Stickstoff zu Sauerstoff dadurch bestimmen, daß man ihre Mengen unter den eben geschilderten Bedingungen vergleicht (meist durch Wägung), wobei noch Korrekturen für die Abweichungen vom idealen Gaszustande anzubringen sind. Ebenso kann man gasförmige Stickstoffverbindungen des Sauerstoffs, wie das Oxydul und das

Oxyd, mit Sauerstoff vergleichen, und diese endlich kann man analysieren. So erhält man eine Anzahl voneinander unabhängiger, also einander kontrollierender Zahlen; und es hat sich ergeben, daß alle innerhalb der Arbeitsgenauigkeit zusammenstimmen. Das Verbindungsgewicht des Stickstoffs liegt danach zwischen den Grenzen N = 14,008 und N = 14,000, wenn für Sauerstoff O = 16,000 gilt.

Silber und Chlor. Zu weiteren Zahlen kommt man durch Untersuchung eines Stoffes, der außer Sauerstoff und Stickstoff nur noch ein anderes Element enthält. Die in neuester Zeit außerordentlich sorgfältig bestimmte Zusammensetzung des Silbernitrats, das ein solcher Stoff ist, erlaubt demnach das Verbindungsgewicht des Silbers zu finden. Silber bildet seinerseits sehr gut definierte Verbindungen mit den halogenen Elementen Chlor, Brom, Jod, und so kann man durch Vergleich von Silber etwa mit dem aus ihm zu gewinnenden Chlorsilber das Verbindungsgewicht des Chlors finden.

Alkalimetalle, Wasserstoff, Ammonium. Von diesem kann man auf die Alkalimetalle Kalium und Natrium, sowie auf das diesen sehr ähnliche, aus Stickstoff und Wasserstoff zusammengesetzte Ammonium übergehen. Die Alkalimetalle bilden so viele Salze, daß man von ihnen aus zu sehr vielen anderen Elementen weiter kommen kann; das Ammonium dagegen bildet die Brücke zu einer kontrollierenden Nebenreihe. Denn man kann den gasförmigen Wasserstoff ebenso wie den Stickstoff mit dem Sauerstoffe vergleichen, sowohl direkt durch Gaswägung wie auch durch Untersuchung des aus beiden Stoffen zusammengesetzten Wassers (analog dem Stickoxydul). So erhält man die Beziehung von Stickstoff zu Wasserstoff und also das Verbindungsgewicht des Ammoniums.

Ferner kann man auch das gasförmige Chlor und dessen Wasserstoffverbindung, den Chlorwasserstoff, genau wie Stickstoff und Wasserstoff auf den Sauerstoff beziehen, und endlich kommt man zum Schluss der Kontrolle durch Analyse des dem Chlorsilber und Chlorkalium analogen, nur aus Chlor, Stickstoff und Wasserstoff bestehenden Chlorammoniums.

Einige Zahlen mögen diese Ueberlegung ergänzen.

Die ideale Gasdichte von NO steht zu der von O_2 im Verhältnis 0,35851:0,38228 = 1:1,06630, folglich ist, wenn O_2 = 32,000, NO = 32:1,06630 = 30,001, und **N = 32,001 — 16,000 = 14,001.** Nach der Analyse ist NO:O = 1,8760, also NO = 16.1,8760 = 30,002, und **N = 14,002.** Die Gasdichte von N_2 ist 1,1418 mal so klein als die von O_2, folglich N_2 = 32:1,1418, oder **N = 14,002.**

Ferner ist $AgNO_3$:Ag = 1,57479, oder NO_3:Ag = 0,57479, daraus folgt 62,002 :0,57479 = **Ag = 107,880.**

Weiter ist AgCl:Ag = 1,32870, also Cl:Ag = 0,32870, oder 107,880.0,32870 = **Cl = 35,457.** Nach der Gasdichte ist H_2:O_2 = 2,0156:32, also **H = 1,0078.**

Chlorwasserstoff ergibt HCl:O_2 = 1,13965, also HCl = 36,469, und **Cl = 35,461.**

Endlich ist NH_4Cl:Ag = 0,49590, demnach NH_4Cl = 53,500 und NH_4Cl — NH_4 = 53,500 — 18,034 = **Cl = 35,466.**

Die drei Werte für Cl sind innerhalb der Fehlergrenzen gleich.

Alle anderen Elemente lassen sich nun an eins oder mehrere dieser Fundamentalelemente anschließen.

Die analytischen Methoden sind natürlich von Fall zu Fall sehr verschieden und müssen auf das Genaueste hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit geprüft werden, besonders dann, wenn der Arbeitsfehler großen Einfluß auf das gesuchte Ergebnis haben kann. Ein Beispiel dafür bildet das Schwermetall Wismut. Dieses wird derart mit seiner Sauerstoffverbindung Wismutoxyd verglichen, daß zur Wägung das Oxyd und das Metall kommen. Die Gewichtsdifferenz entspricht dem Sauerstoffe und beträgt noch nicht einmal 12% des Metalls oder 10% des Oxydes, demnach wirft sich der Fehler einer jeden der beiden Bestimmungen mit acht- bis zehnfacher Größe auf diese Differenz und somit auf das gesuchte Verbindungsgewicht. In solchen Fällen muß man derartig in Betracht kommende Differenzen direkt zu bestimmen suchen, statt wie in diesem Beispiele indirekt.

Die gegenwärtig genauesten Zahlen der einfachen Verbindungsgewichte der Elemente sind nun folgende. Sie werden jedes Jahr von der Internationalen Atomgewichtskommission neu berechnet, deren Mitglieder zurzeit Clarke für Amerika, Thorpe für England, Ostwald für Deutschland, Urbain für Frankreich sind.

Internationale Atomgewichte 1912.

Ag	Silber	107.88
Al	Aluminium	27.1
Ar	Argon	39.88
As	Arsen	74.96
Au	Gold	197.2
B	Bor	11.0
Ba	Barium	137.37
Be	Beryllium	9.1
Bi	Wismut	208.0
Br	Brom	79.92
C	Kohlenstoff	12.00
Ca	Calcium	40.07
Cd	Cadmium	112.40
Ce	Cerium	140.25
Cl	Chlor	35.46

Co	Kobalt	58.97
Cr	Chrom	52.0
Cs	Cäsium	132.81
Cu	Kupfer	63.57
Dy	Dysprosium	162.5
Er	Erbium	167.7
Eu	Europium	152.0
F	Fluor	19.0
Fe	Eisen	55.84
Ga	Gallium	69.9
Gd	Gadolinium	157.3
Ge	Germanium	72.5
H	Wasserstoff	1.008
He	Helium	3.99
Hg	Quecksilber	200.6
In	Indium	114.8
Ir	Iridium	193.1
J	Jod	126.92
K	Kalium	39.10
Kr	Krypton	82.9
La	Lanthan	139.0
Li	Lithium	6.94
Lu	Lutetium	174.0
Mg	Magnesium	24.32
Mn	Mangan	54.93
Mo	Molybdän	96.0
N	Stickstoff	14.01
Na	Natrium	23.00
Nb	Niobium	93.5
Nd	Neodymium	144.3
Ne	Neon	20.2
Ni	Nickel	58.68
Nt	Niton	222.4
O	Sauerstoff	16.000
Os	Osmium	190.9
P	Phosphor	31.04
Pb	Blei	207.10
Pd	Palladium	106.7
Pr	Praseodym	140.6
Pt	Platin	195.2
Ra	Radium	226.4
Rb	Rubidium	85.45
Rh	Rhodium	102.9
Ru	Ruthenium	101.7
S	Schwefel	32.07
Sb	Antimon	120.2
Sc	Scandium	44.1
Se	Selen	79.2
Si	Silizium	28.3
Sm	Samarium	150.4
Sn	Zinn	119.0
Sr	Strontium	87.63
Ta	Tantal	181.5
Tb	Terbium	159.2
Te	Tellur	127.5
Th	Thor	232.4
Ti	Titan	48.1
Tl	Thallium	204.0
Tu	Thulium	168.5
U	Uran	238.5
V	Vanadium	51.0
W	Wolfram	184,0
X	Xenon	130.2
Y	Yttrium	89.0
Yb	Ytterbium	172.0
Zn	Zink	65.37
Zr	Zirkonium	90.6

Wahl der Verbindungsgewichte. Die Existenz des Satzes von den multiplen Proportionen zeigt, daß in manchen Fällen zwischen mehreren Werten für das Verbindungsgewicht zu wählen ist. Hierfür bedarf es natürlich eines neuen Kriteriums. Die wichtigsten der für diese Entscheidung herangezogenen Eigenschaften sind Kristallform, spezifische Wärme, Dampfdichte und elektrochemisches Aequivalent.

Dampfdichte. Sehr wesentliche Dienste leistet in solchen Fällen, wo der zur Untersuchung stehende Stoff in Gasform gebracht werden kann, das oben zitierte Prinzip von Avogadro. Es erlaubt nach Bestimmung des Volumgewichts eines Gases unter gegebenem Druck und gegebener Temperatur (der Dampfdichte oder Gasdichte) dessen Verhältnis zum Sauerstoffvolumgewicht zu berechnen, und dieses Verhältnis ist gleich dem Verhältnisse der Verbindungsgewichte. Nun ist das Verbindungsgewicht des Sauerstoffs zu 16 angenommen worden, er hat aber als Gas eine Dichte, die, wie in der Molekularlehre (vgl. den Artikel „Molekularlehre") begründet wird, zu der Annahme zwingt, daß er in freier Form mit dem doppelten Verbindungsgewichte auftritt, also 32. Alle auf Sauerstoff bezogenen Dampfdichten müssen deshalb, um die Verbindungsgewichte zu ergeben, mit 32 multipliziert werden. Für das Quecksilberchlorid, welches aus 26,1% Chlor und 73,9% Quecksilber gebildet wird, würde, wenn wir das Verbindungsgewicht von Chlor zu 35,46 (s. o.) annehmen, das des Quecksilbers $x:73,9 = 35,46 : 26,1$, also $x = 100$ sein, demnach das der ganzen Verbindung $100 + 35,45 = 135$. Die Dampfdichte ist aber, auf Sauerstoff bezogen, gleich 8,45, folglich das Verbindungsgewicht $8,45 . 32 = 270$. Demnach muß dem Quecksilber in dieser Verbindung das doppelte Verbindungsgewicht zugeschrieben werden und die Formel lautet nicht HgCl, sondern $HgCl_2$. In der Literatur etwa der Liebigschen Zeit ist eine solche Verdoppelung oder „Zweiwertigkeit" vielfach durch durchstrichene Symbole ausgedrückt worden, also Hg = 100. (Das Quecksilberchlorür hat die der Formel HgCl entsprechende Dampfdichte 7,3). Die Verwertung der Dampfdichte setzt mehrere unter verschiedenen Bedingungen ausgeführte Bestimmungen voraus, weil viele Stoffe abnorm große (Assoziation, vgl. den Artikel „Molekularlehre") oder abnorm kleine (Dissoziation, vgl. den Artikel „Thermische Dissoziation" Dampfdichten zeigen und diese dann je nach Druck und Temperatur verschieden ausfallen. Nur wenn dies nicht der Fall ist, darf die gefundene Zahl als normale Dampfdichte der Rechnung zugrunde gelegt werden; man kann die normale Dampfdichte in jenen Fällen durch Extrapolation

auf Grund gewisser gesetzmäßiger Beziehungen finden. Uebrigens genügt oft eine nicht ganz genau richtige Dampfdichte, da es sich ja meist nur um die Entscheidung zwischen zwei sehr verschiedenen Werten handelt (oben 270 und 135).

Isomorphie. In einen kristallisierten Stoff kann oft an Stelle des einen seiner Elemente ein anderes eingeführt werden, ohne daß sich die Kristallform wesentlich ändert; dies ist besonders dann leicht möglich, wenn auch dieses zweite Element für sich eine chemisch analoge Verbindung von derselben Kristallform geben kann (Mitscherlich 1819). Diese Erscheinung nennt man Isomorphie und die beiden Elemente kristallographisch äquivalent. Das „Einführen" des einen Elementes für das andere geschieht durch gemeinschaftliche Kristallisation, das Produkt nennt man einen Mischkristall. Diese Stellvertretung erfolgt nun erfahrungsgemäß nicht nach gleichen Gewichten, sondern im Verhältnisse der Verbindungsgewichte. So wird, wenn dem Kaliumchlorid etwas Rubidiumchlorid beigemischt wird, das Gewicht des Rubidiums im Kristalle zu dem des Kaliums, mit dem das Chlor dieser Menge Rubidiumchlorid neutrales Kaliumchlorid bilden könnte, sich stets wie 85,4:39,1 verhalten (vgl. die Tabelle S. 727). Dieser Erfahrungsatz, daß die kristallographisch äquivalenten Mengen sich verhalten wie die Verbindungsgewichte, erlaubt, wie man sofort sieht, die Feststellung unbekannter Verbindungsgewichte; auch dieses Kriterium dient meist nur der Entscheidung zwischen wenigen stark verschiedenen Annahmen, so daß man auch bei unvollkommener Isomorphie (Homoiomorphie) einen je nach Umständen mehr oder weniger sicheren Schluß ziehen kann. Isomorphie findet sich auch bei Elementen, z. B. Selen und Schwefel, doch kann man in solchen Fällen die Substitution nach Verbindungsgewichten nicht nachweisen, weil dazu immer die Anwesenheit wenigstens eines dritten Elementes erforderlich ist (vgl. das Beispiel KCl—RbCl).

Wärmekapazität. Die Wärmemenge, die die Gewichtseinheit irgendeines Stoffes braucht, um von der Temperatur t auf (t+1) erwärmt zu werden, nennt man die spezifische Wärme des Stoffes bei t. Diese Größe mit der Masse des Stoffes multipliziert, wenn diese nicht gleich 1 ist, nennt man die Wärmekapazität dieser Stoffmasse. Dulong und Petit haben 1819 gefunden, daß bei gleicher Temperatur die Wärmekapazitäten der Elemente für je 1 Verbindungsgewicht, d. h. also die spezifische Wärme mal Verbindungsgewicht, einer fast universell konstanten Größe gleich sind, für gewöhnliche Temperatur etwa 5 bis 7 kleine Kalorien (vgl. den Artikel „Kalorimetrie"). So ist die spezifische Wärme des Kaliums bei 0° gleich 0,188, sein Verbindungsgewicht gleich 39,1, das Produkt also 0,188.39,1 = 7,3, Lithium hat 0,94.7,0 = 6,6, Schwefel 0,178.32,0 = 5,7, Wismut bei 0° 0,030.208,5 = 6,3. Grobe Ausnahmen sind Kohlenstoff, Silicium und einige andere Elemente, doch nähern sich diese bei hohen Temperaturen den anderen an. Elemente mit Verbindungsgewichten größer als etwa 30 folgen der Regel.

Man nennt diese Wärmekapazität pro Verbindungsgewicht auch die Atomwärme (s. weiter unten). In Verbindungen bleibt die Dulong-Petitsche Regel bestehen (Kopp-Neumannsches oder Joule-Woestynsches Gesetz). So ist die spezifische Wärme von Chlorkalium, KCl, gleich 0,171, sein Verbindungsgewicht ist 74,6, also 0,171.74,6 = 12,8. Kalium hat (s. o.) 7,3, Chlor 0,22.35,46 = 7,8, KCl sollte also die Wärmekapazität 7,3+7,8=15,1 statt 12,8 haben. Die Differenz ist sicher reell und in unvollkommener Gültigkeit der erwähnten Regeln begründet, aber sie ist nicht so groß, daß man nicht zwischen zwei stark verschiedenen möglichen Annahmen der Verbindungsgewichte unterscheiden dürfte.

So kann beispielsweise für Schwefelquecksilber HgS (14,8% S, 85,2% Hg) das Aequivalentgewicht 200 + 32 = 232 sein, wenn das des Quecksilbers 200, oder auch gleich 132, wenn das des Quecksilbers 100 wäre.

Dem ersten Falle entspricht, da die spezifische Wärme des Quecksilbers 0,033 ist, die Wärmekapazität der Verbindung 200.0,033 + 32.0,178 = 12,3, dem zweiten die Wärmekapazität 100.0,033 + 32.0,178 = 9,0. Gefunden ist die spezifische Wärme 0,0517, also würde für den ersten Fall das Verbindungsgewicht 12,3:0,0517 = 238, für den zweiten 9,0:0,0517 = 174 herauskommen. 238 ist fast gleich der für diesen Fall zu erwartenden Zahl 232, dagegen weicht 174 von 132 stark ab.

6. Das Aequivalentgewicht. Bei der Zerlegung von Salzen durch den elektrischen Strom werden gemäß dem bis jetzt ausnahmslos streng gültig befundenen Gesetze von Faraday (vgl. den Artikel „Elektrochemie") durch gleiche Elektrizitätsmengen die Elemente oder Verbindungen in solchen Mengen abgeschieden, daß diese im Verhältnisse der Verbindungsgewichte stehen. So scheidet eine Elektrizitätsmenge von 1 Coulomb aus einer Silberlösung 0,001118 g Silber, aus einer Säure 0,00001040 g Wasserstoff ab. Diese Zahlen verhalten sich wie 0,001118:0,00001040 = 107,1, während die Verbindungsgewichte (s. o.) 107,9:1,008 = 107,1 ergeben. Aus einem Quecksilbersalze, z. B. dem Chlorid $HgCl_2$ (s. o.), scheidet dieselbe Elektrizitätsmenge nur 0,001037 g ab, während das Verbindungsgewicht 200

des Quecksilbers verlangt, daß 107,9:200 = 0,001118:x, also daß x = 0,002074 g abgeschieden würden, d. h. die doppelte Menge. Aus dem Quecksilberchlorür HgCl wird in der Tat diese Menge Hg abgeschieden. Die Erklärung bringt uns die Lehre von der Valenz (s. u.). Wo diese Komplikation nicht in Betracht kommt, gilt der Satz, daß elektrochemisch äquivalente, d. h. durch die gleiche Elektrizitätsmenge abscheidbare, Mengen beliebiger Elemente im Verhältnisse der Verbindungsgewichte stehen, oder, wenn der Einfluß verschiedener Valenz auftritt, im Verhältnisse ganzzahliger Multipla der Verbindungsgewichte.

Valenz (vgl. auch den Artikel „Valenzlehre"). Die eben geschilderten Beziehungen haben sich als so weit gemeinschaftlich gültig gezeigt, daß man berechtigt ist, sie durch einen mit allen in Beziehung stehenden Begriff zu verbinden und also auf sie ein System der Verbindungsgewichte zu begründen, das nicht nur dem Gesetze der konstanten, sondern auch dem der multiplen Proportionen ohne Widerspruch genügt. Widersprüche könnten natürlich auftreten, wenn ein Element mit verschiedenen Mengen eines anderen, nicht nur mit einer einzigen, Verbindungen bilden kann, und wenn solche Fälle, wie es tatsächlich der Fall ist, sich oft wiederholen. So kann Eisen eine Verbindung mit Chlor bilden, die 55,8%, und eine andere, die 65,5% Chlor enthält, d. h. auf Eisen berechnet einmal das 1,264 fache und das 1,896 fache Gewicht Chlor; diese Zahlen verhalten sich wie 1,896:1,264 = 3:2. Man könnte die Formeln also FeCl und $FeCl_{1\cdot5}$ schreiben, da aber die Verhältnisse der Verbindungsgewichte keine gebrochenen Zahlen sein sollen, so muß man dem Eisen ein doppelt so großes Verbindungsgewicht zuschreiben; dann kann man die Formel verdoppeln und setzen $FeCl_2$ und $FeCl_3$. Man hätte aber auch vervierfachen können $FeCl_4$ und $FeCl_6$. Die Wahl nun wird eben auf Grund der vorstehenden Beziehungen getroffen, besonders, wenn es möglich ist, auf Grund der Dampfdichteergebnisse; man wählt dann als Verbindungsgewicht einer Verbindung die Stoffmenge, die unter gleichen Bedingungen von Druck und Temperatur dasselbe Volum einnimmt wie 32 g Sauerstoff.

Man kommt so zu dem Begriffe der Wertigkeit, Valenz oder Sättigungskapazität der Elemente. Darunter versteht man diejenige Anzahl Verbindungsgewichte einiger bestimmter wichtiger Elemente, die das Verbindungsgewicht irgendeines Elementes braucht, wenn es eine Verbindung mit einem jener anderen bildet. Solche Bezugselemente sind Chlor, Kalium, Natrium, Wasserstoff und einige andere, die diesen chemisch sehr nahe stehen; sie werden einwertige Elemente genannt. Demnach beträgt die Valenz des Eisens in der einen der obengenannten Chlorverbindungen mindestens 2, in der anderen 3, die des Quecksilbers im Chlorid $HgCl_2$ 2, (oder 4 wenn man Hg_2Cl_4 annimmt), im Chlorür HgCl nur 1. Eisen und Quecksilber sind also mehrwertige Elemente von mehrfacher Valenz.

Durch Division des Verbindungsgewichtes durch die Valenz erhält man das Aequivalentgewicht. Dieses beträgt also für Quecksilber bei den dem $HgCl_2$ entsprechenden Mercurisalzen 200:2 = 100, bei den Mercurosalzen (wie HgCl) 200:1 = 200. Die Aequivalentgewichte sind identisch mit den elektrolytischen Aequivalenten (vgl. den Artikel „Elektrochemie").

Die Valenz einiger wichtiger Elemente sei hier mitgeteilt:

Alkalimetalle K, Na, Li, Rb, Cs einwertig.
Erdalkalimetalle Ba, Sr, Ca zweiwertig (Mg ein- und zweiwertig).
Schwermetalle Zn, Cd zweiwertig, Fe zwei- und drei-, Al drei-, Ag ein-, Cu und Hg ein- und zweiwertig.
Nichtmetalle: H ein-, O zwei-, N drei- oder fünf-, S zwei-, C vier-, P drei- oder fünf-, Si vierwertig.

Bei der Nomenklatur der Verbindungen drückt man solche Stufen der Valenz durch bestimmte Silben aus: Salze des einwertigen Quecksilbers heißen Mercuro-, des zweiwertigen Mercurisalze, Salze des zweiwertigen Eisens Ferro-, des dreiwertigen Ferrisalze.

7. Darstellung der Tatsachen durch den Atombegriff. Die Zusammenfasssung der hier geschilderten Verhältnisse erlaubt die anfangs angedeutete Vorstellung vom Atom. Man stellt sich die erwähnten sehr kleinen Körperchen als mit charakteristischen Eigenschaften der Elemente begabt vor, so daß es so viele Arten Atome wie Elemente gibt. Ein Sauerstoffatom ist 16:1,0077 = 15,88 mal so schwer wie ein Wasserstoffatom, es hat eine andere spezifische Wärme als dieses usf. Es können definitionsgemäß nicht Bruchteile von Atomen in eine Verbindung eintreten, also müssen die multiplen Proportionen durch ganze Zahlen für jedes Atom ausgedrückt werden, und die Valenz muß stets eine ganze Zahl sein. In isomorphen Stoffen vertritt ein Element das andere Atom für Atom; die Wärmekapazität aller Arten von Atomen ist gleich groß; in gleichen Gasräumen sind bei gleichem Drucke und gleicher Temperatur gleichviel Atome (aber Molekeln, vgl. den Artikel „Molekularlehre") enthalten. Dies sind die behandelten Sätze in der Sprache der Atomlehre ausgedrückt. Die Valenz stellt sich in dieser Anschauung dar als eine Anzahl von Stellen auf dem Atom, an denen dieses sich mit einem anderen zusammenlagern kann.

Damit hängen die Vorstellungen über die räumliche Gestalt der Atome zusammen, die sich als ein sehr wichtiges Hilfsmittel der räumlichen Darstellung von chemischen Formeln erwiesen haben. Besonders in der organischen Chemie (Kohlenstoffverbindungen) hat sich eine Annahme über die Gestalt des Kohlenstoffatoms bewährt. Danach ist dieses ein Tetraeder, dessen vier Ecken die Bindungsstellen sind (van't Hoff, Le Bel). Hierdurch wird nicht nur die Vierwertigkeit des Kohlenstoffs ausgedrückt (Kekulé), sondern auch die Tatsache der optischen Isomerie. Näheres über die Atomformen und Valenzpunkte gehört in die Strukturchemie oder Atomverkettungslehre (vgl. die Artikel „Organische Chemie“ und „Isomerie“).

Der Vorteil dieser Zusammenfassung vieler Tatsachen durch den Atombegriff ist in mnemonischer und heuristischer Beziehung so groß gewesen, daß man sehr oft der Ansicht begegnet, er sei eine Denknotwendigkeit. Man hat auch manche Tatsachen und Eigenschaften nur mit Rücksicht auf den Atombegriff benannt und es versäumt, nur die Tatsachen ausdrückende, den hypothetischen Inhalt des Atombegriffs nicht berücksichtigende Bezeichnungen zu schaffen (z. B. Atomvolumen, Atomrefraktion, Atomwärme). Wenn also auch in diesem Texte mit Rücksicht auf den allgemeinen Gebrauch solche Ausdrücke verwendet werden, so sollen diese mit dem hypothetischen Begriffe des Atoms nichts zu schaffen haben. Insbesondere soll das Wort Atomgewicht nicht das absolute Gewicht eines Atoms ausdrücken, sondern die auf eine willkürliche Einheit bezogene Stoffmenge, die dieser Einheit chemisch äquivalent ist, das Aequivalentgewicht (vgl. den Artikel „Aequivalent“) oder ein ganzzahliges Multiplum davon (das Verbindungs- oder Molargewicht oder Mol). Die Autoren der alten Literatur (z. B. Berzelius) gebrauchen den Ausdruck fast nur in diesem objektiven Sinne, wie der Umstand zeigt, daß er auch für Verbindungen benutzt wird, z. B. ein Atom schwefelsaures Kalium (gleich 158,2 g) usf.

8. Atomkonstanten. Atomvolumen, Atomkompressibilität, Atomrefraktion. Zu den Eigenschaften der Elemente, die als besonders charakteristisch betrachtet werden, gehören seit langer Zeit die Raumerfüllung und Lichtbrechung.

Man nennt den von 1 g eines Stoffes eingenommenen Raum in ccm sein spezifisches Volum (oder Räumigkeit nach Ostwald), den reziproken Wert, also die Menge pro ccm, sein spezifisches Gewicht. Dichte heißt das spezifische Gewicht dividiert durch das eines willkürlich gewählten Normalstoffes unter gleichen Bedingungen. Für Gase dient das S. 725 definierte Idealgas, de facto also der Sauerstoff, traditionell auch die Luft (auf Luft bezogene Dichten müssen zur Reduktion auf jenes Idealgas mit 28,95 multipliziert werden). Bei festen und flüssigen Stoffen sind Dichte und spezifisches Gewicht praktisch identisch, weil für die Dichte als Einheit das spezifische Gewicht des Wassers bei 4° dient und 1 g davon, auf weniger als 0,01% genau, 1 ccm einnimmt.

Die Bestimmung der Dichte erfolgt durch Wägung eines bekannten Volums oder Ausmessung einer bekannten Gewichtsmenge. Jene meist gebräuchliche Methode bedient sich der je nach Umständen verschieden geformten Pyknometer (vgl. den Artikel „Dichte“), mit Marken versehener Gefäße von bekanntem Inhalte. Die Ausmessung bekannter Gewichtsmengen läßt sich bei einfach gestalteten Körpern durch geometrische Längenmessung ausführen; einfacher und gebräuchlicher ist die Anwendung des Archimedischen Prinzips (vgl. den Artikel „Flüssigkeiten“) durch Ermittelung des Auftriebs in einer Flüssigkeit bekannter Dichte, die das Gewicht und damit das Volum der dem Objekte an Volum gleichen Flüssigkeitsmenge angibt. Mit der Flüssigkeit nicht verträgliche Stoffe schließt man in Gefäße ein, deren Auftrieb im leeren Zustande bekannt ist (vgl. den Artikel „Dichte“.) Die Genauigkeit dieser Methoden läßt sich sehr weit treiben, doch muß man mancherlei Korrekturen berücksichtigen und im einzelnen Falle überlegen, ob die „chemische Definition“, d. h. Reinheitszustand und Reproduzierbarkeit des Objektes, der Messungsgenauigkeit entsprechen.

Was nun die Ergebnisse anbetrifft, so lassen diese gewisse Regelmäßigkeiten erkennen. Wir sehen hier ab von den gasförmigen Stoffen, für die ja eine allgemeine Beziehung, das „Gasgesetz“ (vgl. den Artikel „Gase“) bekannt ist, und führen hier nur die für flüssige und feste Elemente möglichst in der Nähe von Zimmertemperatur gefundenen Zahlen an. Unter d ist die Dichte, unter δ die durch das Atomgewicht (s. S. 726) dividierte Dichte, die „Atomkonzentration“, der reziproke Wert des Atomvolums, angegeben. Für Stoffe, die etwas schwankende Werte von d zeigen, wie das folgende Beispiel

Kupfer,	destilliert	8,933
	komprimiert	8,938

sind Mittelwerte gegeben (vgl. die Tabelle auf der nächsten Seite).

Die Gruppen dieser Tabelle enthalten chemisch nahe verwandte Elemente. Man sieht bei den Leichtmetallen und Metalloiden im allgemeinen die Größe δ mit steigender Dichte abnehmen, bei den Schwermetallen der Eisen- und Platingruppe fast konstant

Element	d	δ
Li	0,59	0,084
Na	0,98	0,043
K	0,87	0,022
Rb	1,5	0,017
Cs	1,89	0,0142
Mg	1,74	0,070
Ca	1,55	0,0388
Sr	2,54	0,029
Ba	3,8	0,028
Be	1,9	0,21
B	2,5	0,23
Al	2,58	0,095
Ce	6,9	0,047
C Diamant	3,5	2,9
Graphit	2,2	1,8
Si	2,40	0,085
S monoklin	1,97	0,0615
rhomb.	2,07	0,0647
amorph	1,92	0,0598
Se	4,8	0,061
Te	6,25	0,049
Cl flüss.	1,5	0,042
Br	3,15	0,0395
J	4,66	0,0367
P weiß	1,83	0,059
rot	2,20	0,071
As geschmolzen	5,71	0,076
gelb	3,88	0,052
Sb	6,62	0,055
Sn weiß	7,29	0,061
grau	5,80	0,052
Bi	9,78	0,047
Tl	11,9	0,058
Pb	11,3	0,054
Zn	6,92	0,106
Cd	8,64	0,0768
Hg	13,55	0,0678
Fe rein	7,88	0,141
„ Guß weiß	7,65	0,137
„ „ grau	7,1	0,127
Stahl	7,7	0,137
Co	8,6	0,145
Ni	8,9	0,151
Mn	7,40	0,135
Cr	6,9	0,132
Cu	8,93	0,140
Ag	10,5	0,097
Au	19,3	0,098
Pd	11,4	0,107
Rh	12,1	0,117
Ru	12,3	0,121
Pt	21,5	0,110
Jr	22,4	0,116
Os	22,5	0,118

bleiben. Näheres über diese Regelmäßigkeiten s. in dem Artikel „Chemische Elemente". Nur sei noch hervorgehoben, daß die Atomkonzentration δ in naher Beziehung zur Härte steht; so hat Diamant den größten überhaupt vorkommenden Wert von δ. Doch besteht nicht etwa Proportionalität.

Kompressibilität. Eine weitere Beziehung finden wir zu der Veränderlichkeit des Volumens bei Einwirkung von Druck. Es ist hierbei nicht die dauernde Veränderung gemeint, welche etwa durch Hämmern bewirkt wird, sondern die Elastizität der Stoffe, d. h. ein Nachgeben unter allseitiger Druckwirkung und sofortiges Zurückgehen in das frühere Volumen bei Aufhebung des Druckes. Feste und flüssige Stoffe lassen sich bekanntlich viel weniger leicht zusammendrücken, als die viel weniger dichten Gase. Der Bruchteil ihres Volums, um den sie durch Druck von einer Atmosphäre (rund 1 kg/qcm) verkleinert werden können, der „Kompressibilitätskoeffizient", beläuft sich nur auf einige Milliontel. Man bedarf zur Messung besonderer Apparate, unter denen das Piezometer besonders gebräuchlich ist. Das Prinzip dieser Anordnung besteht darin, daß man das Objekt mit irgendeiner die Volumänderung anzeigenden Anordnung in ein starkwandiges Gefäß bringt und in dieses eine den Druck übertragende Flüssigkeit einpumpt, den Druck aber innen oder außen an einem Manometer abliest.

Die auf Seite 732 folgende Tabelle zeigt einige Kompressibilitätskoeffizienten β (mit 10^6 multipliziert) sowie das Produkt mit der Größe δ.

Man sieht hier in mehreren Gruppen das Produkt $\beta . \delta$ nahezu konstant bleiben. Für diese Fälle kann man folgenden Satz aussprechen: Die absolute Aenderung eines gegebenen Volumens eines Elementes pro Atmosphäre Druck, multipliziert mit dem durch das Quadrat dieses Volumens dividierten Atomgewichte, ist konstant, oder: die relative Aenderung eines gegebenen Volumens pro Atmosphäre, multipliziert mit dem durch dieses Volumen dividierten Molargewichte, ist konstant.

Refraktion. Das Lichtbrechungsvermögen der Elemente läßt sich direkt nur in Ausnahmefällen an den Elementen selbst messen, weil sie meist nicht lichtdurchlässig sind; man bedient sich für die Metalle der Messung der Reflexion. Ferner aber leitet man es aus dem Brechungsvermögen von Verbindungen ab. Auf diesem Wege hat man wieder gesetzmäßige Beziehungen gefunden, indem man die Stoffe nach Mol, d. h. nach durch die Atomgewichte bezeichneten Mengen verglich. (Näheres s. in dem Artikel „Molekularlehre".)

Element	β	$\beta.\delta$
Li	8,8	0,711
Na	15,4	0,66
K	31,5	0,[illegible]
Rb	40	0,69
Cs	61	0,87
Mg	2,7	0,19
Ca	5,5	0,21
C Diamant . . .	0,5	1,4
Graphit . . .	3	0,66
Si	0,16	0,014
S	12,5	0,77
Se	11,8	0,71
Cl flüss.	95	4,0
Br flüss.	51,8	2,05
J	13	0,48
P weiß	20,3	1,18
rot	9,0	0,64
As	4,3	0,32
Sb	2,2	0,12
Sn	1,7	0,10
Bi	2,8	0,13
Tl	2,6	0,15
Rb	2,2	0,12
Zn	1,5	0,16
Cd	1,9	0,16
Hg	3,7	0,25
Fe	0,40	0,056
Ni	0,27	0,041
Mn	0,67	0,090
Cr	0,7	0,09
Cu	0,54	0,075
Ag	0,84	0,081
Au	0,47	0,046
Pd	0,38	0,041
Pt	0,21	0,023

Beziehungen zwischen den Atomgewichten. Die hier charakterisierten Regelmäßigkeiten haben zur Aufstellung von Systemen geführt, in denen die Elemente sich nach verschiedenen Eigenschaften in gleiche Reihenfolge ordnen (vgl. den Artikel „Chemische Elemente“).

Literatur. **W. Ostwald**, *Lehrbuch der allgemeinen Chemie. Leipzig 1891.* — **Derselbe,** *Grundriß der allgemeinen Chemie. Leipzig 1909.* — **W. Nernst**, *Theoretische Chemie. Stuttgart 1909.* — **H. Landolt,** *Ueber die Erhaltung der Masse bei chemischen Umsetzungen. Halle 1909.*

K. Drucker.

Atwood

George.

Geboren 1745; gestorben am 11. Juli 1807 in London. Er besuchte die Westminster Scool, lebte als Fellow des Trinity College in Cambridge, wurde 1776 zum Mitglied der Royal Society ernannt, erhielt später eine Sinecure. Im Jahre 1784 erfand Atwood eine Fallmaschine, die die Gesetze des freien Falls der Körper nachzuweisen ermöglichte.

E. Drude.

Aufmerksamkeit.

1. Begriff der Aufmerksamkeit. 2. Die Auffassungs-(Bewußtseins-)stufen. 3. Vorbereitung und Erwartung mit ihren Wirkungen. 4. Die unwillkürliche Aufmerksamkeit. 5. Der Aufmerksamkeitsumfang und die Ablenkung. 6. Schwankungen der Aufmerksamkeit. 7. Aufmerksamkeit und Gedächtnis

1. Begriff der Aufmerksamkeit. Der Versuch, das Gemeinsame all der Fälle herauszuheben, in denen wir im laxeren Sprachgebrauch den Namen Aufmerksamkeit verwenden, führt kaum weiter als zu der etwas vagen Formulierung, es liege überall ein „lebhaftes Hervortreten und Wirksamwerden einzelner seelischer Gebilde auf Kosten anderer“ vor, oder anders gewendet wir finden, daß „einzelne Bewußtseinsinhalte oder Tätigkeiten vorübergehend der Mittelpunkt des ganzen psychischen Lebens werden, während in demselben Maße der übrige Bewußtseinsinhalt in niederem Grade bewußt ist und seinen Einfluß auf den Gang der psychischen Tätigkeit verliert“. Dabei heißt bald dies Hervortreten selbst Aufmerksamkeitsprozeß, bald wird die Verfassung des Subjekts, von der es abhängt, Zustand der Aufmerksamkeit genannt.

Eine wissenschaftliche Präzisierung dieser Tatsachen wird nun vielfach auf dem Wege erstrebt, daß man das Hervortreten und Wirksamwerden als Eigenschaften ansieht, die unseren Bewußtseinsinhalten in wechselndem Grade zukommen; diese Eigenschaften werden als Klarheit (Deutlichkeit) und Lebhaftigkeit (Eindringlichkeit) bezeichnet. Klarheit und Lebhaftigkeit müssen dann, wenn man konsequent sein will, in Parallele gestellt werden zu der Qualität und Intensität der Empfindungen, also etwa der Tonhöhe und Tonstärke, und müssen in irgendeinem Grade auch jeder Empfindung zugeschrieben werden.

Die hier gemeinte Lebhaftigkeit ist nicht zu verwechseln mit der Intensität, denn es können z. B. Empfindungen von ganz geringer Intensität sein, die sich durchsetzen und tiefgehende Wirkungen hinterlassen, und es können Empfindungen von hoher

Intensität spurlos vorübergehen. Lebhaftigkeit ist vielmehr gar nichts anderes wie das Sichdurchsetzen, Wirksamwerden selbst.

Der Begriff der Klarheit ist aus dem Gebiet des Sehens entlehnt. Die Luft ist klar, heißt, sie ist gut durchsichtig; ein Gegenstand ist klar abgebildet, wenn die Konturen scharf sind und Einzelheiten sich gut herausheben. Unklar sehen wir die Dinge in großer Ferne oder in der Dämmerung; unklar auch bei schlechter Akkommodation der Linse unseres Auges. Aus anderen Gründen verschwinden in der Peripherie unseres Gesichtsfeldes die feineren Raum- und Farbendetails; auch das nennen wir Unklarheit. Aehnlich nun gehen feinere und sogar grobe Unterschiede, feine und grobe Einzelheiten der Dinge für unser Bewußtsein auch verloren, ohne daß wir das Auge, allgemeiner ohne daß wir die peripheren Aufnahmeapparate unserer Sinneswerkzeuge dafür verantwortlich machen könnten. Das sind dann die Fälle, in denen wir von einer zentral bedingten, einer Aufmerksamkeitsunklarheit unserer Wahrnehmungen sprechen; und das übertragen wir dann auch auf Vorstellungen und Gedanken.

Die Frage bleibt, wie denn dies Verlorengehen zustande kommt. Und da gibt es zwei Richtungen in den Erklärungsversuchen; die eine sucht die Ursachen in relativ peripheren, die andere in zentraleren Phasen der Wahrnehmungsprozesse. Vielleicht hat die eine für diese, die andere für jene Gruppen von Tatsachen recht. Es mag sein, daß es in der Tat so etwas gibt wie ein Verschwimmen, Ineinanderfließen schon der Empfindungsinhalte selbst und als physiologische Basis dafür mag eine diffusere Verbreitung der Nerverregungen in relativ tieferen Zentren des Gehirns in Frage kommen. Soweit das zutrifft, soweit gibt es echte, zentral bedingte „Klarheitsgrade“ der Empfindungen selbst.

Doch dürfte das von untergeordneter Bedeutung sein. Nur der scheint mir den Tatsachen gerecht zu werden, der in dem Beachten, dem Unterscheiden, dem Zusammenfassen besondere psychische Prozesse sieht, die sich auf die Empfindungsinhalte richten. Prozesse, die auftreten oder auch ausbleiben im Anschluß an die Empfindungen und von deren Auftreten oder Ausbleiben es abhängt, ob diese oder jene Bestimmtheiten, Einzelheiten, welche das Empfindungsmaterial tatsächlich enthält, für uns verloren gehen oder aber im weiteren psychischen Geschehen wirksam werden. Für die Gesamtheit dieser Vorgänge verwendet man zweckmäßig den Terminus „Apperzeptionsvorgänge“. Wir können hier für diese Auffassung nur das eine anführen, daß nur sie es verständlich zu machen vermag, wie die „Klarheit“ bald diesem, bald jenem abstrakten Moment an den Empfindungsinhalten zukommen kann. Wenn der besondere Ton einer Farbenempfindung beachtet wird, so braucht es nicht gleichzeitig auch die Helligkeit zu werden usw. Es wird diese Tatsache auch physiologisch wohl nicht anders zu deuten sein als so, daß das Geschehen das eine Mal diese, das andere Mal eine andere Fortsetzung erfährt. Im Bewußtsein aber korrespondieren diesen verschiedenen Fortsetzungen verschiedene Prozesse der Auffassung und Deutung.

Noch weniger wird es angehen der Tatsache, daß sich einzelne Empfindungen und Vorstellungen gleichsam mit größerer Energie vordrängen, in den Mittelpunkt schieben, einfach so gerecht zu werden, daß man neben die Intensität der Empfindungen noch die zweite quantitative Eigenschaft der Lebhaftigkeit stellt. Lebhaftigkeit ist nur ein bequemer Ausdruck für bestimmte Beachtungsvorgänge. Wenn wir sagen, sehr starke Reize rufen zwar sehr lebhafte aber keineswegs klare Empfindungen hervor, so heißt das, es schließt sich an ihre Empfindungen, neben manchen unangenehmen Nebenempfindungen, die sie begleiten mögen, die besondere Beachtung ihres Vorhandenseins, vielleicht auch ihrer Intensität an, während ihre qualitative Bestimmung dadurch gerade leidet. Wenn wir von der Aufdringlichkeit einer besonderen Farbe oder eines Geruches sprechen, so heißt das in unserem Sinne, sie erzwingen sich regelmäßig eine solche Beachtung.

Wir begeben uns damit nicht der Möglichkeit anzuerkennen, daß dieselben Vorgänge das eine Mal lebhaft im Sinne von rasch und exakt, das andere Mal matt im Sinne von langsam und unexakt verlaufen können. Das eine wird bei körperlicher Frische, das andere im Zustand der Schläfrigkeit oder Ermüdung der Fall sein. Aber wir werden uns hüten, den Unterschied, der zwischen einem beachteten und einem unbemerkt vorübergegangenen Ton besteht, zu verwechseln mit dem Unterschied zwischen einem frischen, pünktlichen Prozeß des Bemerkens und einem matten, nachhinkenden Bemerken, wie es bei großer Ermüdung vorkommt.

Aus dem großen Gebiet der unter dem Namen der Aufmerksamkeit gehenden Tatsachen, sollen hier in erster Linie die berücksichtigt werden, die mit den Vorgängen der sinnlichen Wahrnehmung zusammenhängen, einmal weil sie besser bekannt und leichter darzustellen sind und dann weil sie hier wohl mehr Anspruch auf Interesse haben.

2. Die Auffassungs- (oder Bewußtseins)-stufen. Unser Nervensystem ist ein Stufen-

bau. An den motorischen Leistungen, die direkt auf Reize hin erfolgen, läßt sichs vielleicht am deutlichsten zeigen, wie jede höhere Stufe im Sinne einer Zusammenfassung oder Differenzierung oder im Sinne einer Kontrolle des Erfolgs in die Funktionen der niederen eingreift.

Auch an den physiologischen Vorgängen, die unseren Wahrnehmungen dienen, sind mehrere Stufen beteiligt; und dieser anatomischen und physiologischen Stufenstruktur entspricht auch ein Stufenbau der psychischen Prozesse der Wahrnehmung. Das ergibt sich unverkennbar z. B. aus gewissen pathologischen Tatsachen. Wir finden bei den verschieden tiefgehenden und verschieden weit ausgebreiteten Läsionen der Sinnessphären der Großhirnrinde und ihrer Nachbarschaft eine stufenweise Auflösung der seelischen Prozesse, die mit jenen Gebieten verknüpft sind; z. B. eine schrittweise Auflösung der Prozesse des optischen Erkennens oder des akustischen Erkennens. Die Psychiater haben sich bemüht, die Zahl dieser Stufen aufzufinden und sie gegen einander abzugrenzen, sie sind aber noch nicht zu übereinstimmenden Resultaten gekommen.

Das psychologische Experiment fängt jetzt an, auch dieses Gebiet sich zu erobern. Verschiedene Phasen des optischen Erkennens vermochte man der Selbstbeobachtung schon zugänglich zu machen. Bei kurzer Exposition einfacher optischer Gebilde erhält man sie dadurch nebeneinander im Bewußtsein, daß man den Versuch macht, verschiedene Feststellungen in einer einzigen Beobachtung zu machen. Die Aufgaben ordnen sich dann allemal einander unter und das Nebensächliche bleibt vielfach auf halbem Wege stecken. Es sind an ganz einfachen Erkennungsvorgängen wenigstens drei Phasen zu unterscheiden: 1. das schlichte Gegebensein eines Eindrucks, 2. die Beachtung und 3. die Konstatierung.

Wir beschäftigen uns während einer relativ längeren Expositionszeit mit der Auffassung einer einzigen Figur im Gesichtsfeld; die anderen, die auch noch da waren, sind uns nicht völlig entgangen. Wir vermögen sie unmittelbar nach dem Verschwinden des Reizes noch aufzufassen. Bevor diese Auffassungsprozesse eintreten, sind die Eindrücke im Bewußtsein schon gegeben. Es kann auch die Gestalt einer Figur aufgefaßt werden, während ihre Farbe nur mitgegeben bleibt, aber nicht auch aufgefaßt wird. Die Beachtung, das Bemerken eines Eindrucks ist in der Regel nicht zu trennen von seiner Bestimmung und diese erfolgt immer in einer gewissen Richtung, von einem Gesichtspunkt aus. Der Gesichtspunkte gibt es auch bei ganz einfachen Gegenständen recht viele. Der optische Reiz bestehe etwa aus fünf dunklen Punkten auf hellem Grunde; bei passender Einstellung des Auges werden alle fünf im Bewußtsein repräsentiert sein. Was wird beachtet? Vielleicht die Größenverschiedenheit der Punkte, oder ihre Zahl oder ihre räumliche Anordnung z. B. die Gestalt der Figur, deren Eckpunkte sie darstellen könnten usw.

Wenn wir nun bei dem Ergebnis der Beachtung verweilen, es eigens fixieren z. B. durch die Anwendung eines Namens, so erleben wir die dritte Phase des ganzen Prozesses, das Konstatieren. Oft geht dem formulierten Urteil des Konstatierens noch eine Phase voraus, in welcher dieses Urteil schon vorbereitet ist und der Beobachter die Sicherheit besitzt, es vollenden zu können; das ist das Stadium des potentiellen Wissens.

Diese Stufen lassen sich nur feststellen, wenn der ganze Prozeß irgendwie gehemmt wird oder seine Richtung ändert. Leicht läßt sich der Wechsel verschiedener Beachtungsgesichtspunkte auf optischem Gebiet demonstrieren. Wir betrachten ein optisches Muster, etwa ein Quadrat aus lauter regelmäßig angeordneten schwarzen Punkten auf weißem Grunde. Die Punkte werden sich bei längerem Fixieren wie von selbst bald in horizontalen bald in vertikalen Reihen präsentieren, oder in der Richtung einer Diagonalen, oder das ganze Quadrat erscheint zerlegt in kleinere Rechtecke, oder es hebt sich in der Mitte ein kleineres Quadrat heraus usw. Der ruckartige Wechsel, der hier jedesmal auftritt, ist ein Wechsel in der Beachtung der Figur. Es kommt jedesmal ein anderer Gesichtspunkt der Auffassung zur Herrschaft. Es liegt prinzipiell nichts anderes vor, wenn wir an einem einzelnen Ton zuerst die Höhe und dann die Lautheit beachten. Daß uns hier der Umschlag der Auffassung nicht so eindrucksvoll erscheint, hat seine guten Gründe in der Isolierung des Tones. Seine Höhe oder Lautheit hebt sich nicht ab von der anderer Tonempfindungen, während alle Raumbeziehungen in unserem ersten Falle auf lauter Empfindungselemente fundiert sind und daher selbst viel zwingender, viel eindeutiger auftreten.

3. Vorbereitung und Erwartung mit ihren Wirkungen. Ob eine Empfindung Beachtung erfährt, ob dieser oder jener Gesichtspunkt dabei eingenommen wird, das hängt zum Teil vom Zustand des Subjekts, zum Teil vom Charakter des Reizes ab.

Der günstigste Zustand des Subjekts ist das, was man gewöhnlich die Erwartung nennt, die Vorwegnahme des Kommenden in der Vorstellung oder im Denken. Zweckmäßig ist es indes zu unterscheiden zwischen der Vorbereitung der kommenden Leistungen

und der Vorwegnahme des Resultats, d. h. der Erwartung in einem spezielleren Sinne des Wortes. Die Vorbereitung braucht keine Erwartung, wenigstens keine spezielle Erwartung zu enthalten. Die Vorbereitung zu einer Beobachtung beginnt mit der Uebernahme einer Aufgabe. Wir denken an das Ziel der Beobachtung und davon gehen meist automatisch eine Reihe von Wirkungen aus. Während ich ein Buch lese, kommt mir etwa der Gedanke an die Zeit, begleitet von dem Wunsch, sie zu wissen; und daran schließen sich ohne weiteres die Bewegungen der Hand, des Kopfes an, schließen sich die Einstellungen der Augen an, die nötig sind zur Ablesung der Zeigerstellung meiner Taschenuhr. Nur bei ungeläufigen und komplizierten Beobachtungsleistungen werden außer dem Ziel auch die einzelnen Stadien des ganzen Prozesses, der es verwirklicht, explizite voraus bewußt. Der geübte Beobachter hat in der Vorbereitungszeit außer dem Ziel nichts in seinem Bewußtsein; und auch dieses verschwindet allmählich daraus, wenn sich die gleichen Beobachtungen wiederholen. Es bleibt dann nur ein Zustand der Spannung bestehen, der Hauptsache nach ein Komplex von Muskel- und Gelenkempfindungen, aus jenen Muskelsystemen her, welche die Einstellung des Sinnesorgans und die gespannte Haltung des Kopfes oder gar des ganzen Körpers und die Hemmung der Atmungstätigkeit besorgen.

Sonst ist das Bewußtsein leer; es sind alle psychischen Prozesse unterbrochen, und das ist für Beobachtungen der günstigste Zustand. Die Vorbereitungen haben sich hier außerhalb des Bewußtseins vollzogen; daß sie überhaupt vorhanden sind, beweisen bestimmte Tatsachen. Reaktionsversuche, bei denen auf das Erscheinen eines Reizes hin möglichst rasch eine verabredete einfache Bewegung auszuführen ist, haben gelehrt, daß die Reaktionszeit beträchtlich verkürzt wird, wenn dem Versuch ein Signal vorausgeht. Das ist auf Veränderungen im m o t o r i s c h e n Gebiet des Zentralnervensystems zurückzuführen. Die Wirkung kann noch vergrößert werden durch eine einseitige Begünstigung der motorischen Seite der Leistung in der Vorbereitung. Auf s e n s o r i s c h e m Gebiete finden wir eine Erhöhung der Empfindlichkeit, die sich messen läßt an der Herabsetzung der Reizschwelle. Vermutlich wird auch allgemein die Empfindungsintensität etwas erhöht durch die Vorbereitung; es sprechen dafür Beobachtungsserien im Vergleichen der Lautheit zweier Töne, von denen der eine unter günstigen, der andere unter ungünstigen Vorbereitungsbedingungen geboten wurde. Wir dürfen diese sensorischen Wirkungen wohl zum Teil auf eine Erhöhung der Empfänglichkeit im zentralen Teil des funktionierenden Sinnesapparats zurückführen; vielleicht findet die ankommende Erregung dort schon eine ganz schwache ähnliche Erregung vor.

Die Tatsache, daß auch die U n t e r s c h i e d s e m p f i n d l i c h k e i t erhöht wird, können wir damit nicht erklären. Denn mit einer Verstärkung beider Erregungen wird ja ihr relativer Unterschied, auf den es hier immer ankommt, nicht größer. Handelt es sich um Qualitätsunterscheidungen, so kann man zur Not mit der Annahme auskommen, die Erregungs b a h n e n seien da gegenseitig schärfer isoliert. Bei Intensitäten versagt dagegen auch diese Deutung. Man wird dagegen allen Tatsachen gerecht durch die Annahme, daß durch die Vorbereitung auch d i e Prozesse schon begünstigt, schon zurechtgelegt werden, welche sich an die Empfindungen anschließen, nämlich die Akte der Auffassung. Wir wissen schon lange, daß wir über die Gesichtspunkte bestimmen können, welche maßgebend werden sollen. Neuere Versuche (W e s t p h a l) haben gezeigt, daß wir auch die Reihenfolge ihrer Wirksamkeit und die Art ihrer Unterordnung in weiten Grenzen im voraus zu regeln vermögen. Und H ö c h s t l e i s t u n g e n e r f o r d e r n eben a u f a l l e n G e b i e t e n d e s B e o b a c h t e n s e i n e s p e z i e l l e V o r b e r e i t u n g d e s o d e r d e r A u f f a s s u n g s a k t e s e l b s t.

Eine sehr bekannte und wichtige Wirkung spezieller Vorbereitung ist die A n a l y s e v o n G e s a m t e i n d r ü c k e n. Vielgestaltige Reizkomplexe kommen oft nur in einem undifferenzierten Gesamteindruck in unserem Bewußtsein zur Geltung. Unsere Wahrnehmung der taktilen Eigenschaften der Körper, der Härte oder Weichheit, der Glätte oder Rauhigkeit, Trockenheit oder Feuchtigkeit usw. beruht größtenteils auf solchen Gesamteindrücken. Auch auf dem Gebiete des Gesichtssinnes finden sie sich; wo wir etwa Aehnlichkeiten zwischen menschlichen Gesichtern entdecken, ohne die Einzelheiten angeben zu können, auf denen sie beruhen, haben wir es mit solchen unanalysierten Gesamteindrücken zu tun. Durch eine passende Vorbereitung können wir da eine Differenzierung eintreten lassen. Das klassische Beispiel einer solchen Auflösung bildet die K l a n g a n a l y s e. Wir vermögen bekanntlich statt des einfachen Klanges, den uns z. B. eine Violinsaite liefert, eine Mehrheit von Tönen zu hören. Die dazu nötige Vorbereitung besteht anfangs darin, daß wir den herauszuhörenden Oberton zunächst isoliert vernehmen und festhalten, um ihn dann in dem Klange wiederzufinden. Es bleibt da — so hat man diesen Vorgang erklärt — von dem vorausgehenden Hören noch eine ganz schwache Erregung zurück, welche

die ihr entsprechende Komponente der nachkommenden Erregung verstärkt. Für das Bewußtsein resultiert dann dasselbe, wie wenn die entsprechende Partialschwingung durch physikalische Mittel z. B. durch einen Resonator verstärkt würde. Diese Erklärung ist aber nicht vollständig, denn eine solche Erregungssteigerung erhöht nur die Intensität des Partialtons und macht ihn dadurch der isolierten Auffassung leichter zugänglich, diese Auffassung selbst ist immer noch ein eigener Prozeß. Nach einiger Uebung ist die Hilfe des vorausgehenden isolierten Tones überflüssig. Und wenn sich dann nach sehr langer und intensiver Beschäftigung mit diesen Dingen die Obertöne förmlich aufdrängen, so wird man kaum mehr eine vorausgehende Verstärkung eines jeden einzelnen von ihnen annehmen können. Was hier bereit liegt, sind nicht mehr einzelne Tonvorstellungen, sondern etwas Funktionelles, die Art des Wanderns der Beachtung von einem gegebenen Grundton aus nach bestimmt entfernten Punkten der Tonreihe hin, an welchen die Obertöne zu finden sind. Man nennt solche durch Uebung erworbene Bereitschaft zu komplexen Betätigungen E i n s t e l l u n g e n. Sie lassen sich auf allen Gebieten des Seelenlebens nachweisen; besonders leicht auf motorischem Gebiete, da konnten auch schon einige Gesetzmäßigkeiten ihres Entstehens und Vergehens aufgedeckt werden.

Nehmen wir statt der auszuführenden Akte schon das Resultat dieser Akte in der Vorbereitung auf eine Beobachtung voraus, so laufen wir Gefahr uns im Sinne dieser Vorwegnahme zu täuschen; besonders wenn wir von mehreren möglichen Ergebnissen eines e i n s e i t i g begünstigen. Es soll eine der bestbekannten Erwartungstäuschungen hier noch besondere Erwähnung finden, nämlich die sogenannte Z e i t v e r s c h i e b u n g. Zwei objektiv annähernd gleichzeitige Ereignisse kann man in der Auffassung bald in der einen bald in der anderen Richtung sukzedieren lassen durch eine Aenderung der Erwartung. Die Größe der gerade nicht mehr umkehrbaren objektiven Ungleichzeitigkeit beträgt z. B. für zwei gleiche und nicht weit auseinanderliegende optische Reize $^1/_{20}$ bis $^1/_{10}$ Sekunde. Unter ungünstigeren Beobachtungsverhältnissen, so wenn es sich um die Eindrücke zweier verschiedener Sinnesgebiete handelt, kann sie noch beträchtlich größer werden. Die persönlichen Differenzen der nach der alten Augen- und Ohrmethode gemachten Durchgangsbestimmungen der Astronomen betrugen große Bruchteile von Sekunden. Und diese Differenzen sind, wie das Experiment gezeigt hat, nichts anderes als Erwartungstäuschungen. Maßgebend ist bei dieser Zeitverschiebung nicht, wie man anfangs wohl gemeint hat, die einfache Begünstigung, Betonung des einen der beiden Reize in der Vorbereitung; denn man kann sehr gut auch auf denjenigen Reiz das Gewicht legen, der nachfolgen soll. Maßgebend ist vielmehr die E r w a r t u n g eines speziellen Sukzessionsverhältnisses. Diese Erwartung ändert, soweit man sehen kann, nichts an dem Eintritt der Empfindungen. Denn man kann oft nachträglich sein Urteil noch korrigieren. Wer rasch nach der Beobachtung mit einer veränderten Erwartung an den Gedächtnisresiduen der Empfindungen eine Nachprüfung vornimmt, findet nicht selten, daß er sich zuerst geirrt hatte. Das setzt aber voraus, daß die Empfindungen selbst die Sukzession der Reize richtig wiedergespiegelt haben. Die Verschiebung geht — wie auch die anderen Erwartungstäuschungen — erst innerhalb der Auffassungsprozesse vor sich.

4. Die unwillkürliche Aufmerksamkeit. Gar oft verschaffen sich bei uns Empfindungen Beachtung, auf die wir nicht vorbereitet sind, ja die gar nicht hineinpassen in den Konnex von Aufgaben, unter deren Wirksamkeit wir gegenwärtig stehen. Und Aehnliches gilt auch für reproduzierte Vorstellungen und Gedanken. Es erhebt sich die Frage, unter welchen Bedingungen das geschieht.

Da ist zunächst zu betonen, daß jede Vorbereitung nicht nur dem speziell zu erwartenden Eindruck zugute kommt, sondern auch anderen, die ihm in einer Hinsicht nahe stehen. Wenn wir z. B. subtile akustische Beobachtungen machen, vermögen ganz geringe Geräusche sich durchzusetzen, auf die wir sonst nicht im mindesten achten. Da ist die ganze akustische Sphäre in einen Zustand erhöhter Beachtungsdisposition versetzt. Dann ist daran zu erinnern, daß einmal gestellte und energisch verfolgte Aufgaben lange nachwirken können; sie befinden sich in einem Latenzzustand, werden aber durch geringfügige Anstöße aktuell und machen dann ihren Einfluß geltend. Wer vergeblich etwas gesucht oder sich auf einen Namen besonnen hat, erlebt es, daß ihm nach Stunden mitten in einem ganz anderen Zusammenhang das Vermißte in die Augen springt, daß er mit dem Namen laut oder leise herausplatzt. Da liegt eine Nachwirkung des vorausgegangenen Suchens vor. Für das, was mit unseren gewohnten Beschäftigungen zusammenhängt, bestehen dauernd derartige latente Beachtungsdispositionen, die leicht aktuell werden. Sie machen einen wichtigen Bestandteil dessen aus, was wir „I n t e r e s s e“ nennen; ein rein theoretisches Interesse für einen Gegenstand ist nichts anderes als ein Inbegriff von bestimmten Beachtungsdispositionen (das praktische Moment unserer Interessen da-

gegen gehört der Gefühls- und Willensseite unseres Wesens an).

Aber außerdem gibt es sicher auch Eigentümlichkeiten der Reize, die sie befähigen sich ohne Vorbereitungshilfen und selbst gegen alle Widerstände durchzusetzen. Es gibt schreiende Farben, die uns auf der Straße aus der tiefsten Meditation herausreißen; es gibt penetrante Gerüche und penetrante Geräusche, die sich immer Beachtung verschaffen. Da ist die Qualität der Empfindung von stets überwältigender Eindringlichkeit. Das Gleiche gilt allgemein von hohen Intensitäten, doch bestehen in beidem große individuelle Differenzen; auch wirkt Gewohnheit beträchtlich abstumpfend. Als Aequivalent für hohe Intensität können auch längere Dauer, große räumliche Ausbreitung und gehäufte Wiederholungen eines Reizes eintreten. Der in seine Arbeit Vertiefte hört vielleicht nicht den ersten aber den fünften Anruf, der objektiv nicht stärker war; ein Geräusch mag sich vielmals monoton wiederholt haben, bis wir es beachten und dann zu unserem Aerger nicht mehr los werden können. Ob in diesen Fällen eine kumulierende Wirkung der Wiederholung vorliegt oder ob nur einmal eines der Reihenglieder zufällig in eine Phase geringerer Konzentration fiel und deshalb beachtet wurde, wird nicht immer leicht auszumachen sein; möglich ist wohl beides.

Bekannt ist, daß auf optischem Gebiet Bewegtes sich leicht Beachtung verschafft; die Netzhautperipherie besonders scheint geradezu dafür prädisponiert zu sein, selbst auf unbedeutende räumliche Veränderungen die Aufmerksamkeit und damit auch den Blick hinzulenken. Wir verstehen die Nützlichkeit dieser Einrichtung und erklären uns ihr Funktionieren vor allem durch eine hohe latente Beachtungsdisposition, die alles Bewegte durch tausendfache Uebung für uns gewonnen hat. Auch andere Veränderungen und besonders diejenigen, die sich plötzlich abspielen, wirken auf den verschiedenen Sinnesgebieten ähnlich wie Bewegung.

Eine Erfahrungstatsache, die sich nicht bestreiten läßt, ist es, daß auch das Neue, Seltene, Ungewohnte als solches sich Beachtung zu erzwingen pflegt. Den Psychologen mutet das zunächst etwas paradox an; denn das Neue ist dadurch charakterisiert, daß es keine oder nur geringe assoziative Resonanz in der Seele findet; und gerade diese Resonanz wird sonst als eine wichtige Beachtungsbedingung angesehen. Nun soll das Fehlen dieser Resonanz zu derselben Wirkung führen. Die Schwierigkeit löst sich auf durch die Tatsache, daß nicht alle Assoziationen die Beachtung begünstigen. Viele wirken wie ein Abfluß, der die ankommenden Eindrücke ins gewohnheitsmäßig Unbeachtete hinüberleitet. Ist dem aber so, dann ist es nicht mehr unbegreiflich, daß auch eine Art Stauung des psychischen Geschehens, die dann eintritt, wenn ein Abfluß auf gewohnte Assoziationsbahnen nicht stattfindet, beachtungsbegünstigend wirken kann.

Viel besprochen ist endlich die Tatsache, daß das Aufhören eines gewohnten Eindrucks die Beachtung auf sich lenkt. Wie der Müller erwacht, wenn seine Mühle stehen bleibt, so macht sich uns das Stillstehen einer Zimmeruhr oder die Dämpfung des gewohnten Straßenlärms nach einem Schneefall bemerklich. Bei der Erklärung dieser Dinge muß erstens im Auge behalten werden, daß oft längere Zeit vergeht, bis das Aufhören auffällt. Das deutet darauf hin, daß das nur geschieht in einer Aufmerksamkeitspause, wenn wir ungewollt und unbewußt einen Augenblick von der Arbeit aufhorchen. Es ist zweitens vielfach so, daß zunächst nur ein Fremdheitseindruck entsteht; wir müssen erst suchen, was sich denn geändert hat, was uns befremdlich vorkommt. Das beweist, daß da ein unanalysierter Gesamteindruck zuerst mitspielt, an dem uns die Veränderung zum Bewußtsein kommt.

5. Der Aufmerksamkeitsumfang und die Ablenkung. Wird uns ein optischer Gegenstand ganz kurze Zeit (etwa $^1/_{10}$ Sek.) dargeboten, so können wir bei guter Vorbereitung nachher mancherlei Angaben über ihn machen. Bestand er aus einer kleinen Gruppe einfacher Figuren, so können wir ihre Zahl, ihre Farben, einen Teil ihrer Gestalten richtig bezeichnen. Von den uns geläufigen Gestalten einfacher geometrischer Figuren, Ziffern, Buchstaben oder kurzer Wörter können nach einer speziellen Vorbereitung etwa 6 richtig benannt resp. abgelesen werden. War noch mehr vorhanden, so wissen wir das, können aber nicht genauer bestimmen, was es war. Die Konstatierungen, die hier gemacht werden, finden sicher alle erst nach der Expositionszeit statt. Es ist uns zunächst nur ein Gesamteindruck gegeben, der nachher analysierend verarbeitet wird. Was uns verloren ging, war zum Teil auch im Bewußtsein gegeben, wurde aber rasch wieder vergessen; das Konstatieren kam da zu spät.

Der Versuch beweist jedenfalls, daß auf der Stufe des schlicht Gegebenen mancherlei in unserem Bewußtsein gleichzeitig nebeneinander existieren kann. Für die höchste Auffassungsstufe, das Konstatieren liegt die Sache anders. Sind in einer Beobachtungszeit mehrere Konstatierungen auszuführen, so erfolgen sie immer nacheinander. Es kann also offenbar immer nur ein einziger Sach-

verhalt in einem Augenblick konstatiert werden. Doch ist hervorzuheben, daß dieser Sachverhalt nicht so einfach zu sein braucht wie die Gleichheit oder Verschiedenheit zweier Empfindungen oder die Zahl der Seiten eines Polygons. Es sind manche Feststellungen nötig, um eine Zeichnung als mikroskopisches Hautschnittbild zu erkennen. Und wenn jemand nach längerer Betrachtung diese Konstatierung trifft, so geht manches von dem was er vorher einzeln erfaßt hat, mit in den bewußten Sachverhalt der Schlußkonstatierung ein. Wir können heute noch nicht übersehen, wieweit in solchen Fällen die Kompliziertheit des wirklich Bewußten zu gehen vermag.

Wohl aber läßt sich sagen, daß mit einer Konstatierung zusammen noch manches im Bewußtsein schlicht gegeben sein kann, was nicht zum konstatierten Sachverhalt gehört. Ich konstatiere in einer Beobachtung die Farbe einer Figur, während allerhand anderes zu weiteren Konstatierungen schon bereit liegt in meinem Bewußtsein. Auch daß mehrere unabhängige Gesichtspunkte gleichzeitig einem Objekt gegenüber eingenommen werden, scheint nicht gänzlich ausgeschlossen zu sein. Die Regel ist es freilich, daß hier dasselbe geschieht, was wir auch auf motorischem Gebiete finden: entweder die beiden Leistungen organisieren sich zu einer Gesamtleistung oder sie werden nacheinander ausgeführt. Zwei ungewohnte komplizierte Bewegungen können recht gut mit dem rechten und dem linken Arm gleichzeitig ausgeführt werden, wenn sie nur für unser (kontrollierendes) Bewußtsein ein Ganzes bilden. Genau so kann ich sehr wohl an einem Polygon die längste Seite und die Gestalt gleichzeitig beachten; nur müssen die beiden Sachverhalte sich zu einem Ganzen zusammenfügen. Sie können das z. B. in der Weise, daß die längste Seite als Basis dient, über welcher sich der Rest der Seiten wie ein Bogen ausspannt. So kann ich die längste Seite und die Eckenzahl in der Tat in einem Akt beachten. Beobachter, die diese Art der Polygonauffassung gar nicht kennen oder doch nicht regelmäßig anwenden, verfallen unter dem Zwang der Aufgabe einer gleichzeitigen Beachtung immer darauf, sie auszuführen.

All die Schranken, die wir jetzt angedeutet haben, gehören mit zu dem, was man kurz als die Enge der Aufmerksamkeit neben dem weiteren Umfang des Bewußtseins bezeichnet. Es leuchtet ein, daß weder das eine noch das andere einfach durch eine Zahl von Bewußtseinsinhalten meßbar sein kann. Unmöglich sind nur zwei gleichzeitige Akte des Konstatierens. Aber der festgestellte Sachverhalt kann recht verwickelt sein; und daneben kann noch allerhand anderes schlicht gegeben sein.

Gelingt es, sich während einer tachistokopischen Darbietung mit etwas anderem zu beschäftigen, während die Augen auf das Feld gerichtet und akkommodiert sind, dann wissen wir beträchtlich weniger über das Gesehene auszusagen. Immerhin können noch etwa 3 Figuren richtig benannt oder 3 kurze Wörter gelesen werden. Wir waren jetzt während der Darbietung von dem optischen Reiz abgelenkt. Das Resultat läßt sich leicht interpretieren. Es braucht anfangs nicht weniger im Bewußtsein gegeben gewesen zu sein. Fragen wir statt nach der Gestalt der Figuren nach ihrer Anzahl, so erhalten wir leicht die richtige Angabe, daß es 8 oder 10 waren. Im Bewußtsein gegeben waren also die Figuren. Daß die Gesamtleistung gesunken ist, liegt wesentlich an der nachträglichen analysierenden Bearbeitung des Eindrucks. Weil wir nicht darauf vorbereitet waren, deshalb kamen wir zu spät zum Konstatieren, es war schon recht viel wieder vergessen.

Es wäre von Wichtigkeit, die Beeinträchtigung, welche die verschiedenen körperlichen und geistigen Leistungen unter dem Einfluß größerer oder geringerer Ablenkung erfahren, genauer studieren zu können. Einstweilen ist es aber noch nicht gelungen, längere Ablenkungszustände von einiger Konstanz mit experimentellen Hilfsmitteln hervorzurufen. Reize, die einem anderen Sinnesgebiet als die Hauptleistung angehören, sind sehr wenig wirksam, ja stören nach kurzer Gewöhnungsfrist überhaupt nicht mehr. Unregelmäßig intermittierende Eindrücke sind etwas besser als konstante. Am stärksten haben sich immer noch gefühlsbetonte Reize, wie starke Gerüche oder solche Dinge erwiesen, die zum Nachdenken anreizen; das Sichbesinnen auf einen Namen, die Spannung auf die Fortsetzung einer fesselnden Erzählung oder einer vorgespielten Melodie lenken im hohen Grade ab.

Werden zwei Leistungen verlangt, die nebeneinander herlaufen sollen, so gelingt das recht gut, sobald die eine von ihnen gar keine oder eine geringe Anforderung an die Aufmerksamkeit stellt. Mechanisches Zählen, Hersagen auswendiggelernter Silben, Summen bekannter Melodien braucht z. B. optische Beobachtungen nicht im geringsten zu stören. Machen beide Leistungen Beachtungsansprüche, dann können sie immer noch aufrecht erhalten werden, wenn sie sich zeitlich so ineinander schieben lassen, daß immer die einen in den Beachtungspausen der anderen erledigt werden.

6. Schwankungen der Aufmerksamkeit. Wer in tiefer Stille auf das leise Ticken einer Taschenuhr lauscht, wird konstatieren kön-

nen, daß ihm die Schläge in langsamen Schwankungen bald lauter, bald leiser erscheinen, mitunter auch ganz verschwinden und wieder auftauchen. Aehnliches fand man bei gerade überschwelligen Helligkeitsunterschieden und bei Tastreizen und stellte dann die Lehre von der regelmäßig periodischen Funktion der Aufmerksamkeit auf.

Sorgfältige neuere Untersuchungen haben gezeigt, daß diese Schwankungen nicht einheitlich erklärt werden können, sondern auf verschiedenen Sinnesgebieten verschiedenen Ursachen zuzuschreiben sind. Schwache Helligkeitsdifferenzen verschwinden infolge schnellerer Erschöpfung der stärker gereizten Netzhautstellen und tauchen dann natürlich immer wieder auf, wenn kleine Fixationsbewegungen der Augen die Bilder auf der Netzhaut verschieben. Beim Tastsinn treten Schwankungen überhaupt nicht immer auf; sie können jedenfalls Minuten lang ganz ausbleiben. Ueber die Gehörsschwankungen gehen die Meinungen noch auseinander. Auf eine Tätigkeit des Musculus tensor tympani, des Trommelfellspanners, können sie jedenfalls nicht zurückgeführt werden, denn sie wurden auch von Menschen ohne Trommelfell und Gehörknöchelchen beobachtet. Vielleicht ist es wie beim Tastsinn, daß sie überhaupt nicht immer sich einstellen. Uebrigens muß hier besonders sorgfältig auf die Konstanz der äußeren Bedingungen gesehen werden, bei Taschenuhren schwankt vielfach die Intensität der Reize. Der Rhythmus ist bei all diesen Schwankungen nur dann regelmäßig, wenn sich der Beobachter unbewußt auf ihn eingestellt hat.

Auf zentraler Ermüdung beruhen wohl die langwelligen und wie es scheint unvermeidbaren Schwankungen beim binokularen Wettstreit. Wer eine Brille mit zwei verschiedenfarbigen Gläsern aufsetzt, sieht die Gegenstände besonders in den zentralen Partien seines Gesichtsfeldes bald von der Farbe des einen bald von der des anderen Glases übergossen, unter gewissen selteneren Bedingungen mischen sich auch die beiden. Im allgemeinen sind hier auch die Faktoren der Vorbereitung entscheidend. Es zeigt sich aber, daß keine der beiden Hauptauffassungen über bestimmte Zeitgrenzen hinaus aufrecht erhalten werden kann. Es setzt sich immer auch die andere wieder durch und behauptet dann um so länger das Feld, je weiter die vorausgehende Periode ausgedehnt worden war.

Etwas anders zu erklären ist das Oscillieren der Auffassungen bei vieldeutigen Figuren. Die Linienskizze eines Würfels z. B. ist perspektivisch mehrdeutig und bei längerer Fixation wechseln die Deutungen unregelmäßig ab. Die Umschläge fallen häufig in die durch Lidschlag oder Fixationsbewegungen hervorgerufenen kleinen Erkennungspausen oder sind synchron mit Akkommodationsänderungen der Linse. Das können indes nur auslösende Momente sein, denn eine konstante Koordination zwischen ihrer Art und den einzelnen möglichen Auffassungen besteht nachweislich nicht. Auch treten die gleichen Umschläge bei optischen Nachbildern auf, die doch durch Blickbewegungen und Akkommodationsänderungen nicht in derselben Weise beeinflußt sein können wie die primären optischen Empfindungen. Die Sache wird hier so liegen, daß sich neben einer gerade dominierenden Auffassung immer die andere vorbereitet und sich dann bei Gelegenheit jener peripher bedingten Unterbrechungen oder Veränderungen durchsetzt. Dafür spricht vor allem die Tatsache, daß die Umschläge dadurch sehr eingeschränkt werden können, daß man sich während der Beobachtung noch mit etwas anderem beschäftigt; dann können eben jene Erwartungen nicht mehr so leicht aufkommen.

Analoge aber viel kompliziertere Schwankungen kann man bei jeder länger dauernden und gleichartigen körperlichen oder geistigen Tätigkeit konstatieren, die eine größere Anspannung erfordert. Es ist da immer so, daß auf einen kräftigen Anlauf ein Nachlassen folgt, das wieder durch einen neuen Impuls überwunden werden muß. Messend läßt sich das z. B. an fortlaufenden Rechenleistungen verfolgen. Die günstige Wirkung eines konstanten Rhythmus auf all unser Arbeiten beruht in erster Linie darauf, daß er diese notwendigen Schwankungen reguliert.

7. Aufmerksamkeit und Gedächtnis. Von der Rolle, die das Beachten bei den sogenannten komplexeren seelischen Prozessen spielt, ist noch wenig exakter Beobachtung zugänglich gewesen. Am meisten wissen wir über sein Verhältnis zu den Gedächtnisleistungen.

Was nicht beachtet wurde, verfällt sehr rasch dem Vergessen. Das sahen wir schon oben; kurzdauernde Gesamteindrücke entfallen uns so schnell, daß viele Einzelheiten, die eben noch im Bewußtsein gegeben waren, gleich darauf nicht mehr konstatiert werden können. Da handelt es sich um ein unmittelbares Behalten. Analoges zeigt sich, wo es gilt, Eindrücke für längere Zeit einzuprägen. Gewisse Ergebnisse der Gedächtnisversuche legen die Frage nahe, ob, was gar keine Beachtung erfährt, überhaupt selbst bei noch so vielen Wiederholungen sich in einem nachweisbaren Grade einprägt. Exakt gelöst konnte diese Frage noch nicht werden. Sicher ist aber, daß bei ganz unaufmerksamem Lesen die Zahl der bis zum Auswendigkönnen nötigen Wiederholungen ins praktisch Un-

meßbare wächst, während alles, was die Konzentration auf den Lernstoff fördert, die Zahl der nötigen Wiederholungen herabsetzt; sicher ist auch, daß selbst zufällige Beachtungen und Konstatierungen von Einzelheiten, die während des Lernprozesses auftreten, für dessen Fortschritt nützlich werden können und daß die besonders beachteten Einzelheiten am festesten haften bleiben.

Beim Erlernen von Reihen gilt es nicht nur die einzelnen Glieder einzuprägen, da müssen Assoziationen gestiftet werden. Es hat sich gezeigt, daß das selbst bei sinnlosen, unzusammenhängenden Stoffen fast immer in der Weise geschieht, daß die Reihen sich systematisch gliedern. Kleinere Gruppen und größere Komplexe werden gebildet. Schon der Rhythmus, der immer sich einstellt, wenn wir Reihen lernen, bietet eine Grundlage dafür. In einzelnen Fällen werden noch besondere Hilfsmittel herangezogen; so können sich zu dem Rhythmus Tonhöhenunterschiede beim Sprechen also eine einfache Melodie gesellen, oder es kann ein optisches Schema ausgebildet werden, in dem jedes Glied seinen Platz erhält. An dieser Komplexbildung sind natürlich all die Funktionen beteiligt, für die man den Namen Aufmerksamkeit gebraucht. Und da die Komplexbildung und alles was damit zusammenhängt von kaum zu überschätzender Bedeutung ist für Bildung der Assoziationen, so läßt sich die Frage aufwerfen, ob sich ohne die Beteiligung der Aufmerksamkeit überhaupt Assoziationen bilden. Vielleicht ist die einfache Kontiguität von Erlebnissen, die einfache Gleichzeitigkeit gar nicht imstande Verknüpfungen zuwege zu bringen; vielleicht muß wenigstens eine Beachtung dieser Kontiguität, besser noch eine Auffassung von allerhand anderen Beziehungen hinzukommen, damit Assoziationen sich bilden. Beantworten läßt sich heute auch diese wichtige Frage noch nicht.

Für die Wirksamkeit gestifteter Assoziationen ist die Aufmerksamkeit höchstwahrscheinlich keine unerläßliche Bedingung. Jedenfalls vollziehen sich viele Reproduktionen außerhalb des Kreises, von Gegenständen, denen wir gerade gegenwärtig unsere Beachtung schenken. Ja für die Reproduktion ganz geläufiger Stoffe kann es gelegentlich verhängnisvoll werden, wenn die Aufmerksamkeit sich darein mischt. Wir bringen den Ablauf durch Betonung eines einzelnen Gliedes zum Stocken, so daß gänzliche Leere sich dahinter auftut, oder wir lenken den Prozeß in falsche Bahnen. Das zweckmäßige Verhalten entspricht bei Reihenreproduktionen ganz dem, welches wir bei schwierigen, gut eingeübten Körperbewegungen einnehmen. Auch da dürfen Einzelheiten nicht beachtend festgehalten werden. Unser Beachten muß in beiden Fällen auf das Ganze gehen und darf nur einen regulierenden, kontrollierenden Einfluß auf die mehr peripheren und automatisch verlaufenden Prozesse ausüben. Bei den Bewegungen müssen wir das Ziel im Auge haben. Bei den Reproduktionen legen wir vorauseilend das Schema und andere Hilfsmittel zurecht, die auch bei der Einprägung eine Rolle gespielt haben; handelt es sich um sinnvolle Stoffe, so nehmen wir fast regelmäßig den kommenden Gedanken in der Beachtung schon voraus. Und einzeln beachtet werden auf motorischem Gebiet wie hier nur die Wendepunkte und besonders gefährdete Stellen.

Ganz anders verhält sich die Aufmerksamkeit beim Besinnen. Wir kommen, wenn wir uns auf etwas besinnen, vielfach schon dadurch zum Ziel, daß wir ein gegebenes Reproduktionsmotiv aufmerksam festhalten. Da mag schon durch die Dauer seine Wirksamkeit erhöht werden. Wichtiger aber ist, daß bei diesem Festhalten die Gesichtspunkte der Beachtung wechseln; es tritt bald diese, bald jene Seite der Wahrnehmung oder Vorstellung, von welcher die Rerpoduktion ausgehen soll, bald diese oder jene konkrete Einzelheit hervor und darunter mag sich nun auch diejenige befinden, die für die Stiftung der Assoziation wirksam war. Hilft das nicht, dann gehen wir zu anderem über, von dem eine Reproduktionstendenz zu dem Gesuchten hin zu erwarten steht. Manchmal verlegen wir uns auch aufs Konstruieren. Wir bilden uns, wenn etwa ein Name gefunden werden soll, auf Grundlage der paar Buchstaben oder des Betonungsschemas oder des Klangschemas, das wir schon gefunden haben, ein oder mehrere Wortbilder. Haben wir das richtige getroffen, so erkennen wir es wieder; denn es ist eine allgemeine Erfahrung, daß das Wiedererkennen leichter eintritt als eine selbständige Reproduktion.

Literatur. ***G. E. Müller***, *Zur Theorie der sinnl. Aufmerksamkeit, Leipzig 1873.* — ***C. Stumpf***, *Tonpsychologie, Leipzig, Hirzel, I. Bd. 1883, II. Bd. 1890.* — ***O. Külpe***, *The problem of attention. The Monist XIII 1902.* — ***W. McDougall***, *The physiological factors of the attention-process. Mind N. S., Vol. XI (1902), XII (1903), XV (1906).* — ***E. Dürr***, *Die Lehre von der Aufmerksamkeit, Leipzig 1907.* — ***C. Stumpf***, *Erscheinungen und psychische Funktionen, Abh. d. Berl. Akad. d. Wiss. 1906.* — ***W. B. Pillsbury***, *Attention, London 1908.* — ***E. B. Titchener***, *Lectures on the elementary psychology of feeling and attention, New-York 1908.* — ***W. Wirth***, *Die exp. Analyse der Bewußtseinsphänomene, Braunschweig 1908.* — *Dazu an neueren Einzeluntersuchungen:* ***R. L. Geissler***, *The measurement of attention, The*

Americ. Journ. of Psych., Vol. XX 1909. — **E. Westphal**, *Ueber Haupt- und Nebenaufgaben bei Reaktionsversuchen, Arch. f. d. ges. Psych. Bd. 21 1911 (über Bewußtseinsstufen).* — **R. Pauli**, *Ueber die Beurteilung der Zeitordnung von optischen Reizen, Ebenda.* — *Ueber individuelle Unterschiede der Aufmerksamkeitsprozesse:* **H. C. McComas**, *Some Types of attention, The Psychol. Monographs Vol. XIII, No. 3 (1911).*

K. Bühler.

August

Ernst Ferdinand.

Geboren 1795 in Prenzlau; gestorben 1870 in Berlin. Er wurde 1817 Lehrer am Joachimstalschen Gymnasium in Berlin, 1827 Direktor des Cölnischen Realgymnasiums daselbst. Er konstruierte 1825 sein Psychrometer.

E. Drude.

Aves

die wissenschaftliche Bezeichnung der durch den Besitz von Flügeln und Federn ausgezeichneten Wirbeltierabteilung der Vögel (vgl. den Artikel „Vögel").

Avogadro di Quaregna

Amedeo.

Geboren zu Turin am 9. August 1776 als Sohn eines Staatsbeamten, gestorben am 9. Juli 1856. Er war lange Zeit vergessen, obwohl er in seiner 1811 im Journal de Physique erschienenen Abhandlung Essai d'une manière de déterminer les masses relatives des molécules élémentaires des corps et les proportions, selon lesquelles elles entrent dans ses combinaisons die Grundlagen der heutigen Molekulartheorie dargelegt hatte. Die zuerst betretene juristische Laufbahn gab er bald auf, um sich dem Studium der Mathematik und Physik zu widmen. Als Professor am Lyceum zu Vercelli 1809 bis 1820 betätigte er sich in verschiedenen Untersuchungen als ebenso scharfer Denker wie guter Beobachter, auch in chemischer Richtung. Von 1820 an war er mit einigen Unterbrechungen bis zu seinem Tode Professor der mathematischen Physik in Turin.

Die Tatsache, daß Avogadros grundlegende Auffassung von der Proportionalität der Gasdichten und der Molekulargewichte jahrzehntelang unbeachtet geblieben ist und erst dann reichste Früchte getragen hat, gehört zu den lehrreichsten Erscheinungen, die in der Geschichte einer Wissenschaft vorkommen. Ueber die Ursache und Begleitumstände dieser Vorgänge vgl. Jc. Guareschis ausgezeichnete Schrift Amedeo Avogadro und die Molekulartheorie (Deutsch herausgegeben von Kahlbaum Leipzig).

Avogadros Lehrsatz, wonach in gleichen Gasräumen bei gleicher Temperatur und gleichem Druck eine gleich große Zahl Moleküle enthalten sind, ist nach Gerhardts Versuch, ihn für die richtige Zusammensetzung organischer Stoffe zu verwerten, besonders von Cannizzaro 1858 (vgl. sein Sunto di un corso di filosofia chimica. Deutsch in Ostwalds Klassikern 1891) in seiner Bedeutung für die gesamte Chemie erkannt und seitdem ein Grundpfeiler dieser Wissenschaft geworden. Trotzdem Avogadro nach dem Jahre 1811 mehrmals auf diesen Lehrsatz zurückgekommen ist, besonders eingehend 1821 in einer französischen Abhandlung, die in den Denkschriften der Turiner Akademie erschien, haben die bedeutendsten Chemiker noch ein Vierteljahrhundert lang nichts von ihm gewußt. So erwähnt Hermann Kopp ihn nicht in seiner vierbändigen Geschichte der Chemie.

Uebrigens hat Avogadro auch die anorganische Chemie durch die Feststellung der richtigen Zusammensetzung wichtiger Verbindungen bereichert. Die vollständige Würdigung der Leistungen Avogadros findet man in der genannten Schrift Guareschis. Seine Originalabhandlungen sind schwer zugänglich.

E. von Meyer.

Azingruppe.

Einschließlich der Oxazine und Thiazine.

1. Diazine. 2. Triazine. 3. Tetrazine. 4. Oxazine. 5. Thiazine.

Ersetzt man in einem Benzolring zwei oder mehrere Methin-(CH-)Gruppen durch Stickstoffatome, wie dies im Pyridinring bei einer Methingruppe der Fall ist, so gelangt man zu heterocyklischen Verbindungen, die unter dem Namen „Azine" zusammengefaßt werden. Es sind Azine mit 2 bis 4 N-Atomen in demselben Ringe bekannt, die dementsprechend die Bezeichnung Diazine, Triazine und Tetrazine erhalten haben. An die Stelle eines N-Atoms kann auch Sauerstoff oder Schwefel treten. Im ersteren Falle erhält man die Oxazine im letzteren die Thiazine. Stellungsisomere Diazine werden je nach Anordnung der N-Atome, als Ortho-, Meta- und Paradiazine bezeichnet. Analog ist die Unterscheidung der Oxazine und Thiazine. Die isomeren Triazine und Tetrazine werden in symmetrische, asymmetrische und vicinale eingeteilt. Im allgemeinen benennt man die einzelnen Untergruppen nach ihren Grundkörpern. Die bemerkenswertesten unter den Azinen sind jene, die die Heteroatome (N, O u. S) in Parastellung haben, da sie die Muttersubstanzen wichtiger Farbstoffklassen bilden.

1. Diazine. a) Orthodiazine. α) Pyridazine. Der Grundkörper das Pyrida-

```
     CH
HC       CH
||       |
HC       N
     N
```

zin wird aus seinem Dibenzoderivat, dem sogenannten Phenazon gewonnen. Es ist eine wasserhelle Base von pyridinartigem Geruch. Fp. — 8⁰, Sdp. 208⁰. Allgemein entstehen Pyridazine oder ihre Dihydroderivate durch Einwirkung von Hydrazinen auf 1,4 — Diketone.

β) Benzorthodiazine oder Benzopyridazine sind die Cinnoline und Phtalazine. Cinnolin Fp. 39⁰ ist eine

```
    CH     CH
HC      C      CH
|       ||     |
HC      C      N
    CH     N
```

starke, giftige Base, die aus ihrer Oxycarbonsäure gewonnen wird. Phtalazin Fp. 91⁰,

```
    CH     CH
HC      C      N
|              |
HC      C      N
    CH     CH
```

Sdp. etwa 315⁰ (Zersetzung). Durch Einwirkung von Hydrazinen auf o-Phtalaldehydsäure entstehen Ketohydrophtalazine sogenannte Phtalazone. Ueber die Chlorverbindungen gelangt man von diesen zu den Phtalazinen.

γ) Dibenzorthodiazine oder Dibenzopyridazine. Hierher gehört das Phenazon und seine Derivate. Es wird gewonnen durch Reduktion des o, o-Dinitrodiphenyls. Grüngelbe Nadeln. Fp. 156⁰.

```
  N=N
```

b) Metadiazine. α) Pyrimidine (Miazine). Die Abkömmlinge des Pyrimidins

```
     CH
HC       N
|        ||
HC       CH
     N
```

Fp. 21⁰, Sdp. 124⁰ stehen in naher Beziehung zur Harnsäure- und zur Puringruppe. Purin selbst kann als ein kondensiertes Pyrimidin-Glyoxalin betrachtet werden; die Barbitursäure (Malonylharnstoff ist ein Trioxypyrimidin. Uracile sind Dioxypyrimidine (vgl. den Artikel „Kohlensäurederivate"). Pyrimidine entstehen durch Einwirkung von 1, 3 - Diketonen auf Amidine. Aminopyrimidine, sogenannte Kyanalkine bilden sich durch Polymerisation von Nitrilen mittels Natrium. Das Pyrimidin selbst wird erhalten durch trockene Destillation seiner α-Carbonsäure.

β) Benzometadiazine oder Benzopyrimidine sind die Abkömmlinge des Chinazolins Fp. 48⁰, Sdp. 243⁰. Dieses ent-

```
    CH     CH
HC      C      N
|       ||     |
HC      C      CH
    CH     N
```

steht durch Oxydation seiner Dihydroverbindung. Dihydrochinazoline bilden sich allgemein aus Acylderivaten von o-Aminobenzylaminen durch Wasserabspaltung. Oxydiert gehen sie in ihre Ketoderivate, die Chinazolone über.

c) Paradiazine. α) Pyrazine (Piazine). Diese Verbindungen finden sich unter den Gährungsprodukten des Rübenzuckers und im Fuselöl. Neben Pyridinen (s. d.), denen sie sehr ähneln, entstehen die Pyrazine auch durch Einwirkung von Ammoniak auf Traubenzucker. Synthetisch darstellbar sind sie durch Kondensation zweier Moleküle α-Aminoaldehyd oder Aminoketon. Pyrazin Fp. 55⁰, Sdp. 115⁰ ist eine

```
     N
HC       CH
||       ||
HC   |   CH
     N
```

heliotropartig riechende Base. Durch Reduktion entstehen gleich die Hexahydropyrazine oder Piperazine.

β) Benzopyrazine oder Chinoxaline. Sie werden erhalten durch Kondensation von 1,2 Diketonen mit o-Phenylendiaminen. o-Naphtylendiamine liefern Naphtochinoxaline. Den Stammkörper selbst, das Chi-

```
    CH     N
HC      C      CH
|       ||     |
HC      C      CH
    CH     N
```

noxalin Fp. 27⁰, Sdp. 229⁰ gewinnt man aus Glyoxal und o-Phenylendiamin.

γ) Dibenzopyrazine Phenazin-Gruppe. Zu dieser wichtigen Gruppe gehören die am längsten bekannten Azine, sowie ausgedehnte Farbstoffklassen. Der Stammkörper, das Phenazin, gelbe Nadeln

```
    CH     N      CH
HC      C      C      CH
|       ||  |  ||     |
HC      C      C      CH
    CH     N      CH
```

Fp. 171⁰ wurde zuerst von Claus durch Destillation des azobenzoesauren Kalkes dargestellt und zunächst mit Azophenylen bezeichnet. Merz schlug später den Namen „Azine" vor.

Sie bilden sich unter anderem durch Kondensation von o-Diaminen mit o-Dioxybenzolen oder o-Chinonen. So erhält man Phenazin aus o-Phenylendiamin und Brenzcatechin, α-,β-Naphtazin aus Naphtylendiamin und Naphtochinon.

```
        N
C10H6 < | > C10H6
        N
```

Es ist die am längsten bekannte Azinverbindung (Naphtase 1840). Analog dargestellt werden Naphtophenazine, Phenanthrophenazine und Phenanthronaphtazine. Das Phenanthrazin (Anthrazin) wird aus dem blauen Farbstoff Indanthren durch Zinkstaubdestillation gewonnen. Indanthren ist ein Dihydroanthrachinonazin. — Die Phenazine sind schwach basische, meist gelblich gefärbte Verbindungen, die durch Reduktion in unbeständige Dihydroderivate übergehen.

Amino- und Oxyphenazine. Durch Eintritt der NH_2- und OH-Gruppe werden die Phenazine in Farbstoffe verwandelt (vgl. auch den Artikel „Farbstoffe").

1. Monoaminophenazine oder Eurhodine werden analog den Phenazinen dargestellt durch Einwirkung von Amino-o-diaminen auf o-Chinone. Es sind schwache Basen, die leicht dissoziierbare Salze bilden.

2. Diaminophenazine. a) Unsymmetrische Diaminophenazine entstehen durch Oxydation von o-Diaminen. as-Diaminophenazin

$$C_6H_4\langle{}^{N}_{N}\rangle C_6H_2\langle{}^{NH_2}_{NH_2}$$

b) Symmetrische Diaminophenazine (Toluylenrotgruppe) erhält man durch Oxydation von Aminoindaminen. So entsteht aus dem Indamin Toluylenblau der Farbstoff Toluylenrot (Neutralrot), ein Dimethyldiaminotolu-

$$(CH_3)_2N.C_6H_3\langle{}^{N}_{N}\rangle C_6H_2\langle{}^{NH_2}_{CH_3}$$

phenazin. Neutralviolett ist das niedere Homologe des Neutralrotes.

3. Oxyphenazine oder Eurhodole bilden sich durch Erhitzen der Aminophenazine mit konzentrierter Salzsäure bei 180°.

Phenazoniumverbindungen. In ihnen tritt ein Azinstickstoff fünfwertig auf; sie sind theoretisch und praktisch wichtig, weil sie einerseits über die in diesen Körpern auftretende orthochinoide Bindung Aufschluß geben, andererseits die Grundsubstanzen der großen Farbstoffklassen der Induline und Safranine sind. Die Azoniumverbindungen entstehen durch Kondensation von monosubstituierten o-Diaminen mit o-Chinonen. So erhält man das Phenylphenazoniumchlorid und seine

$$C_6H_4\langle{}^{N}_{N}\rangle C_6H_4 \qquad N\langle{}^{C_6H_5}_{Cl}$$

höheren Kernhomologen. Die wichtigste Eigenschaft dieser Azoniumsalze ist ihre Reaktionsfähigkeit mit Ammoniak und Alkalien unter Bildung von Amino- resp. oder von Oxyverbindungen, die im ersteren Falle Induline, im letzteren Indone genannt werden.

Induline. Benzolinduline oder Aposafranine leiten sich ab vom Aposa-

$$NH.C_6H_3\langle{}^{N}_{N}\rangle C_6H_4 \qquad N.C_6H_5$$

franin. Es ensteht auch durch partielles Entamidieren des Phenosafranins. Das Paraphenylenblau ist wahrscheinlich ein kompliziertes Aposafranin. Rosinduline werden unter anderem gewonnen durch Schmelzen von Benzolazo-α-naphtylamin mit Anilin. Die Grundsubstanz, das Rosindulin $NH.C_{10}H_5(N_2C_6H_5)C_6H_4$ Fp. 199°, ist ein Derivat des Phenylnaphtophenazoniums. Die Disulfosäure der Base ist der Farbstoff Rosindulin; Azocarmin ist eine Disulfosäure des Phenylrosindulins. Isorosinduline sind solche Naphtophenazoniumverbindungen, die die Aminogruppe in der Benzolhälfte enthalten. Isorosindulin $C_{10}H_6(N_2.C_6H_5)C_6H_3.NH$ entsteht aus Chinondichlorimid und Phenyl-β-naphtylamin. Das Basler Blau ist ein Anilinodimethylisorosindulin. Naphtinduline stammen vom Phenylnaphtazonium ab. Naphtindulin $NH.C_{10}H_5(N_2.C_6H_5\ C_{10}H_6$ Fp. 250° wird aus Benzolazo-α-naphtylamin mit α-Naphtylamin und Anilin gewonnen. Die Farbstoffe Naphtylblau und Naphtylviolett sind Anilinoderivate des Naphtindulins. Flavinduline leiten sich vom Phenylphenanthrophenazonium ab. Das Chlorid ist ein gelber Farbstoff.

Indone. Die Indone oder Aposafranone sind die den Indulinen entsprechenden Sauerstoffderivate. Sie entstehen, abgesehen von der bereits erwähnten Darstellungsweise, durch Erhitzen der Induline mit konz. Salzsäure: Aposafranon $O.C_6H_3(N_2.C_6H_5)C_6H_4$ Fp. 242°. Rosindon $O.C_{10}H_5(N_2.C_6H_5)C_6H_4$ Fp. 259°. Seine Sulfosäure ist der Farbstoff Rosindulin G. Isorosindon $C_{10}H_6(N_2.C_6H_5)C_6H_3.O$ Fp. 224°. Naphtindon $O.C_{10}H_5(N_2.C_6H_5)C_{10}H_6$ Fp. 295°.

Safranine. Safranine sind die symmetrischen Diaminoderivate der Azoniumverbindungen. Sie entstehen durch Oxydation eines Indamins mit einem Monoamin, ferner durch Einwirkung von Ammoniak oder Aminen auf acetylierte Induline. Die Safranine sind starke Basen, die wie die Eurhodine dissoziierbare Salze bilden.

Phenosafraninchlorid

$$H_2N.C_6H_3\langle{}^{N}_{N}\rangle C_6H_3.NH_2 \qquad N\langle{}^{C_6H_5}_{Cl}$$

Sein Dimethylderivat liefert den Farbstoff Fuchsia; ein Homologes desselben ist das Giroflé. Amethystviolett ist Tetraäthylphenosafranin, Indazin ein Dimethylphenylphenosafranin. Tolusafranin ist der Hauptbestandteil des roten Farbstoffes Safranin. Ein Trinaphtosafranin ist das Magdalarot. Monophenylsafranine sind die Mauveïne. Durch Oxydation von toluidinhaltigem Anilin erhielt Perkin 1856 das Mauveïn, den ersten technisch dargestellten Anilinfarbstoff.

Erwähnt seien schließlich noch die Farbstoffe Indulin und Nigrosin.

Safranone und Safranole. Jene sind die aus den Safraninen durch Austausch einer Aminogruppe gegen Hydroxyl entstehenden Oxyaminophenazoniumverbindungen; diese die entsprechenden Dioxyderivate. Der Umsatz wird bewirkt durch Kochen mit Kali oder konzentrierter Säure.

Fluorindine. Die Vertreter dieser Farbstoffklasse leiten sich ab vom Fluorindin

```
      N        NH
C6H4<   >C6H2<   >C6H4
      NH       N
```

Sie sind also Dibenzoderivate eines Benzodipyrazins; sie entstehen durch Oxydation der Salze von o-Diaminen.

2) Triazine. a) Symmetrische (γ) Triazine, Kyanidine. Als Grundkörper dieser Gruppe kann der hypothetische Tricyanwasserstoff

```
    //N—CH\\
HC<          N
    \N=CH/
```

gelten. Derivate des sym. Triazins oder Kyanidins erhält man durch Einwirkung von Aluminiumchlorid auf ein Gemenge von Nitril und Säurechlorid. Triphenylkyanidin ist das Kyaphenin, Trioxykyanidin die normale Cyanursäure. Über Melamin Amelid und Amelin (vgl. den Artikel „Cyanverbindungen“):

b) Asymmetrische (α) Triazine. Sie leiten sich von folgendem hypothetischen Stammkörper ab:

```
    N
  /   \\
HC     N
||     |
HC     CH
  \   //
    N
```

Von dem einfachen Ring sind wenig Abkömmlinge bekannt. Benzo-α-triazine oder Phentriazine entstehen durch Kondensation von Formazylverbindungen. Phentriazin

```
      N=CH
C6H4<    |
      N=N
```

Fp. 75°, Sdp. 235—240°.

c) Vicinale (β) Triazine sind nur als Benzodihydroderivate

```
      N  =  N
C6H4<       |
      CH2—N—R
```

bekannt. Sie bilden sich ähnlich wie die Dihydrochinazoline durch Einwirkung von salpetriger Säure auf o-Aminobenzylamine.

3. Tetrazine. a) Vicinale oder Osotetrazine entstehen durch Oxydation von Osazonen. Osotetrazin

```
    N
  //  \
HC     NH
|      |
HC     NH
  \\  /
    N
```

Fp. 51°.

b) Symmetrische Tetrazine und ihre Dihydroderivate entstehen durch Einwirkung von Hydrazin auf sog. Imidoäther. Dihydrotetrazin

```
    CH
  /    \\
NH      N
|       |
N       NH
  \\   /
    CH
```

Fp. 82°. Ein Diketohexahydrotetrazin ist das Urazin oder der Diharnstoff.

c) Asymmetrische Tetrazine sind nicht bekannt.

4. Oxazine. a) Orthoxazine. Der für diese Gruppe typische Ring

```
    N
  //  \
HC     O
|      |
HC     CH2
  \\  /
    CH
```

ist in einigen Verbindungen enthalten, so z. B. in den Benzorthoxazinonen u. a. m.

b) Metoxazine sind die Abkömmlinge des Pentoxalins und Phenpentoxazolins. μ-Phenylpentoxazolin

```
     N
   /   \\
H2C      C.C6H5
|        |
H2C      O
   \   /
    CH2
```

Derivate des Benzometoxazins sind die Cumazonsäuren, Cumarazine sowie die Imido- und Thiocumazone.

c) Paroxazine. Hierher gehören die Morpholine und Phenmorpholine. Morpholin

```
     NH
   /    \
H2C      CH2
|        |
H2C      CH2
   \    /
     O
```

Sdp. 129°, wurde so benannt, weil man im Morphin (s. d.) einen ähnlichen Ring annahm (vgl. den Artikel „Alkaloide“).

Die Gruppe des Dibenzoparoxazins oder Phenoxazins ist besonders bemerkenswert, da eine Reihe wichtiger Farbstoffe hierher gehören. Phenoxazin

```
    CH      O      CH
  //   \  /   \  /   \\
HC      C       C      CH
|       ||      ||     |
HC      C       C      CH
  \\   /  \   /  \   //
    CH      NH     CH
```

Fp. 148° entsteht durch Erhitzen von Brenzcatechin mit o-Aminophenol. Es existieren auch Naphtoxazine, Phenanthroxazine u. a. m., die den entsprechenden Phenazinen analog konstituiert sind. Die zu den Farbstoffen dieser Gruppe führenden Phenoxazinderivate sind wie in der Phenazinreihe, die Sauerstoff- und Ammoniakabkömmlinge; jene werden Oxazone, diese Oxazime genannt.

Oxazone entstehen z. B. durch Kondensation von o-Oxychinonen mit o-Aminophenolen. Phenoxazon

$$O:C_6H_3\langle{}^{O}_{N}\rangle C_6H_4$$

Fp. 217°. Ein Aminoderivat ist das Resorufamin, ein Oxyphenoxazon das Resorufin. Der Farbstoff Gallocyanin ist eine Dimethylaminooxyphenoxazoncarbonsäure, deren Methylester ist der Farbstoff Prune. Delphinblau entsteht gleichfalls aus dem Gallocyanin. Oxazime erhält man durch Kondensation von o-Oxychinonimiden mit o-Aminophenolen. Phenylphenoxazim

$$C_6H_5.N:C_6H_3\langle{}^{O}_{N}\rangle C_6H_4$$

Fp. 197°. Hierher gehörige Farbstoffe sind das Capriblau, ein Diaminophenoxazimderivat und das Naphtol- oder Echtblau (von Meldola), ein Dimethylnaphtophenoxazimchlorid. Amino- und Anilinoderivate des letzteren sind das Nilblau und das Cyanamin. Muscarin ist ein Oxyderivat des Naphtolblaus.

5. Thiazine. Sie entsprechen in jeder Beziehung den Oxazinen; Orthothiazine sind jedoch bisher nicht bekannt geworden.

a) Metathiazine sind die sog. Penthiazoline und Phenpenthiazoline. Sie sind in bezug auf Konstitution und Darstellung ganz die Analoga der Pentoxazoline (s. d.). Sie leiten sich vom hypothetischen Tetrahydrometathiazin ab

```
      N
   //   \
 HC      CH2
  |       |
  S      CH2
   \     /
     CH2
```

b) Parathiazine. Auch hier sind wie bei den Diazinen und Oxazinen die Dibenzoderivate die wichtigsten. Dibenzoparathiazine oder Thiodiphenylamine leiten sich ab vom Thiodiphenylamin

```
   CH      S      CH
 //  \   /   \   /  \\
HC     C       C     CH
|      ||      ||     |
HC     C       C     CH
 \\  /   \   /   \  //
   CH      NH     CH
```

Fp. 180°, Sdp. 370°. Es wird analog dem Phenoxazin aus o-Aminothiophenol und Brenzcatechin gewonnen und ist die Muttersubstanz der wertvollen „Thioninfarbstoffe". Von den Kernhomologen des Thiodiphenylamins seien die Benzonaphto- und -dinaphtoparathiazine erwähnt. Wie bei den Phenazinen und Phenoxazinen entstehen durch Eintritt der OH- und NH_2-Gruppe Derivate, die zu den eigentlichen Farbstoffen resp. ihren Lenkoverbindungen führen.

Phenthiazon

$$O:C_6H_3\langle{}^{N}_{S}\rangle C_6H_4$$

entsteht aus Phenthiazim durch Kochen mit Soda. Oxythiazon ist das Thionol; ein Aminothiazon das Thionolin. Der Farbstoff Gallothionin ist das Analogon des Gallocyanins. Phenthiazim

$$HN:C_6H_3\langle{}^{N}_{S}\rangle C_6H_4$$

wird durch Entamidieren von Thionin erhalten. Dieses ist ein p-Aminophenthiazim; dessen Chlorhydrat bildet das Lauth'sche Violett. Tetramethylthionin ist der wertvolle Farbstoff Methylenblau. Erwähnt seinen schließlich noch das Methylengrün, Thiocarmin und Brillantalizarinblau.

Literatur. ***V. v. Richter***, *Organische Chemie, Bd. II, 10. Aufl., Bonn 1905.* — ***E. Wedekind***, *Heterocyklische Verbindungen, Leipzig 1901.* — ***R. Nietzki***, *Chemie der organischen Farbstoffe, 5. Aufl., Berlin 1906.* — ***G. Schultz***, *Chemie des Steinkohlenteers, Bd. II, Farbstoffe, Braunschweig 1901.* — ***P. Friedländer***, *Fortschritte der Teerfarbenfabrikation, Berlin 1900—1905.*

K. Schädel.

Azoverbindungen.

1. Begriff und Einteilung. 2. Diazoverbindungen und Diazoniumverbindungen: a) Aliphatische Diazoverbindungen. b) Aromatische Diazoniumsalze und Diazoverbindungen. c) Diazoaminoverbindungen. 3. Azoverbindungen: a) Aliphatische Azokörper, b) Fettaromatische Azokörper. c) Aromatische Azokörper. d) Oxyazokörper und Aminoazokörper. e) Disazokörper, Trisazokörper usw. 4. Azoxyverbindungen. 5. Derivate der Stickstoffwasserstoffsäure und andere Verbindungen mit drei und mehr direkt zusammenhängenden Stickstoffatomen: a) Derivate der Stickstoffwasserstoffsäure. b) Verbindungen mit mehr als drei direkt zusammenhängenden Stickstoffatomen.

1. Begriff und Einteilung. Obwohl man unter dem Beg iff „Azokörper" im engeren Sinne nur Verbindungen versteht, welche die Gruppe — N = N — beiderseitig an Kohlenwasserstoffreste gebunden enthält, sollen in diesem Kapitel nicht nur diese, sondern auch eine Reihe von Körpern behandelt werden, welche den eigentlichen Azokörpern nahestehen und mit ihnen die aus zwei Stickstoffatomen bestehende Gruppe gemeinsam haben. In diesem Sinne umfaßt also die Kapitelüberschrift „Azoverbindungen" alle Verbindungen, welche zwei mit mehrfacher Bindung aneinander haftende Stickstoffatome enthalten, soweit diese Stickstoffatome nicht Bestandteile heterozyklischer Kerne sind. Diese Definition schließt schon fast alle im letzten Ab-

schnitt besprochenen Verbindungen mit ein, welche mehr als zwei direkt zusammenhängende Stickstoffatome enthalten, weil von diesen mehreren Stickstoffatomen fast stets zwei mit mehrfacher Bindung aneinander haften. Angefügt sind ihnen nur noch die sogenannten Hydrotetrazone, welche zwar vier direkt zusammenhängende Stickstoffatome, aber zwischen ihnen keine Doppelbindung enthalten. Im Anschluß an die eigentlichen Azokörper sollen aber außerdem noch die in enger Beziehung zu ihnen stehenden Azoxykörper besprochen werden, welche die Gruppe $-N \overset{O}{-} N-$ enthalten. Dagegen sind alle übrigen Verbindungen, welche zwei mit einfacher Bindung aneinander haftende Stickstoffatome enthalten, schon in dem Kapitel „Ammoniakderivate" behandelt werden. Namentlich findet sich dort in dem Abschnitt „Derivate des Hydrazins" (S. 300) alles Nähere über die sogenannten Hydrazoverbindungen und Azoniumsalze. Hierbei möge übrigens erwähnt werden, daß man mit dem Namen Azoniumverbindungen oder Azoniumsalze auch die Stammsubstanzen der Farbstoffe der Indulin- und Safraninreihe belegt, welche die aus zwei aneinander haftenden Stickstoffatomen bestehende „Azo"-Gruppe gar nicht enthalten, sondern Derivate der als „Azine" bezeichneten heterozyklischen Verbindungen sind (s. S. 741). Näheres über diese Verbindungen ist in den Kapiteln „Heterozyklische Verbindungen" und „Farbstoffe" zu suchen. Ebensowenig gehören die sogenannten Azoxoniumverbindungen zu den Azokörpern.

Wie schon erwähnt, nennt man im engeren Sinne „Azokörper" nur Verbindungen, welche die Gruppe $-N=N-$ beiderseitig an Kohlenwasserstoffreste gebunden enthalten und im folgenden soll die Bezeichnung lediglich in diesem Sinne angewendet werden. Als Azokörper gelten also Verbindungen vom Typus $Alk-N=N-Alk$.[1])

Je nach dem Charakter der beiden Kohlenwasserstoffreste, welche die „Azogruppe" miteinander verbindet, unterscheidet man aliphatische, fettaromatische und aromatische Azokörper, von denen die letztgenannte Gruppe bei weitem die wichtigste ist. Enthalten die an der Azogruppe stehenden aromatischen Kerne noch Hydroxylgruppen oder Aminogruppen, so spricht man von Oxyazo- bezw. von Aminoazoverbindungen, die wegen ihrer hervorragenden Bedeutung für die Farbstoffindustrie in einem besonderen Abschnitt zusammengefaßt werden. Als Disazoverbindungen bezeichnet man Komplexe, welche die charakteristische Azogruppe zweimal enthalten.

Außer den Azokörpern gibt es noch eine zweite Klasse von Verbindungen, welche ebenfalls die Gruppe $-N=N-$ enthalten, welche sich aber von den Azokörpern dadurch unterscheiden, daß diese Gruppe nicht an zwei Kohlenstoffwasserreste sondern nur an einen Kohlenwasserstoffrest gebunden ist. Derartige Körper faßt man unter der Bezeichnung „Diazokörper" zusammen. Dieser Name umfaßt aber in Wirklichkeit möglicherweise zwei Körperklassen verschiedener Struktur, die nur in bezug auf Bildungsweise und Verhalten weitgehende Analogie aufweisen. Während man nämlich nach der bis vor kurzem allgemeinen Auffassung bei den aliphatischen Diazokörpern die charakteristische Gruppe $-N=N-$ mit beiden Valenzen an ein und dasselbe Kohlenstoffatom eines Kohlenwasserstoffrestes gebunden, annimmt, so daß diese den Komplex $C\langle\begin{smallmatrix}N\\ \|\\ N\end{smallmatrix}$ enthalten (vgl. jedoch S. 748), ist in den ungleich wichtigeren aromatischen Diazokörpern dieselbe Gruppe $-N=N-$ einseitig an einen aromatischen Kohlenwasserstoffrest, mit der anderen Valenz aber an einen Säurerest oder an irgendein anderes Radikal, wie Hydroxyl oder Amino gebunden. Von den Diazoverbindungen nehmen die letztgenannten, bei denen also die Gruppe $Ar-N=N-$ noch an das Stickstoffatom eines Amins gebunden ist, in gewisser Hinsicht eine Sonderstellung ein und werden als Diazoaminoverbindungen in einem besonderen Abschnitt behandelt. Abgesehen von diesen Diazoaminoverbindungen sind die aromatischen Diazokörper vom Typus $Ar-N=N-X$ äußerst unbeständige Verbindungen, die man als solche kaum kennt, die aber trotzdem als Uebergangsprodukte eine ganz außergewöhnlich wichtige Rolle spielen. Sie entstehen stets nur als sekundäre Umlagerungsprodukte vorübergehend aus anderen Verbindungen und werden regelmäßig sogleich weiter umgesetzt. Für die bei der „Diazotierung" primär entstehenden Verbindungen nimmt man jetzt allgemein eine andere Struktur, nämlich $Ar-N\langle\begin{smallmatrix}X\\ \\ N\end{smallmatrix}$ (mit dreifacher Bindung zwischen den N) an und bezeichnet sie als Diazoniumverbindungen, um durch die Endung „onium" wie üblich ihre Ableitung von einem fünfwertigen Stickstoffatom anzudeuten. Es soll aber ausdrücklich darauf hingewiesen werden, daß die Unterscheidung zwischen Diazoverbindungen und Diazoniumverbin-

---

[1]) In den Formeln dieses Artikels bedeutet „Alph" einen aliphatischen, „Ar" einen aromatischen Kohlenwasserstoffrest, während „Alk" diese beiden Kategorieen zusammenfaßt, also ganz allgemein irgendeinen Kohlenwasserstoffrest bezeichnet.

dungen noch nicht lange eingeführt ist und daß man daher in allen älteren Büchern die Diazoniumverbindungen als Diazoverbindungen formuliert und beschrieben findet, während die jetzt als Diazoverbindungen angesehenen Uebergangskörper dort als solche noch nicht erwähnt oder aber anders (z. B. als Nitrosamine) formuliert werden.

Aus praktischen Gründen werden hier die Diazoniumverbindungen und Diazoverbindungen vor den Azokörpern beschrieben werden. Anschließend an die Azokörper folgen die Azoxyverbindungen, welche die „Azoxygruppe" $-\overset{O}{N}-N-$ beiderseitig an Kohlenwasserstoffreste gebunden enthalten.

Aehnlich wie man die Alkylamine als Substitutionsprodukte des Ammoniaks auffaßt, kann man die Azo-, Diazo- und Diazoniumverbindungen als Substitutionsprodukte von Stickstoffwasserstoffverbindungen $HN=NH$ bezw. $H_2N\equiv N$ ansehen, die man aber als solche bisher nicht kennt. Wohl kennt man aber eine andere Stickstoffwasserstoffverbindung in freiem Zustande, die mehrfach aneinander gebundene Stickstoffatome enthält. Es ist die sogenannte Stickstoffwasserstoffsäure, für die man die Formel $H.N\langle\begin{smallmatrix}N\\ \|\\ N\end{smallmatrix}$ oder $H.N:N\vdots N$ annimmt. Diese Verbindung selbst ist schon im Artikel „Ammoniakderivate" (S. 269) kurz beschrieben worden und wird im Artikel „Stickstoff" noch ausführlicher behandelt, ihre organischen Substitutionsprodukte gehören aber hierher. Man benennt sie im allgemeinen als Azide, und zwar, wenn für das Wasserstoffatom ein organischer Säurerest (Acyl- oder Acidylgruppe, abgekürzt: Ac) eingetreten ist, als Säureazide; ist das Wasserstoffatom durch einem Alkylrest ersetzt, so bezeichnet man die Verbindung als Alkylazid oder als Alkylester der Stickstoffwasserstoffsäure, in dem besonderen Falle aber, daß der Alkylrest ein aromatischer Kern ist, gewöhnlich als Diazoimid oder auch als Azoimid.

Abgesehen von den Diazoaminoverbindungen, die aus praktischen Gründen bei den Diazoverbindungen behandelt werden, schließen sich dann an die Derivate der Stickstoffwasserstoffsäure die wenigen bekannten anderen Verbindungen an, welche eine aus mehr als drei direkt zusammenhängenden Stickstoffatomen bestehende Gruppe enthalten und zwar insbesondere die Tetrazone von der Formel $(Alk)_2\,N-N=N-N(Alk)_2$. Die Bisdiazoaminoverbindungen, in denen man eine fortlaufende Kette von fünf Stickstoffatomen entsprechend der Formel

$$Ar.N{=}N{-}N(H){-}N{=}N.Ar \quad \text{oder}$$
$$Ar.N{=}N{-}N(Alk){-}N{=}N.Ar$$

annimmt, gehören zu den Diazoaminoverbindungen und sind daher bei den Diazoverbindungen erwähnt worden.

2. Diazoverbindungen und Diazoniumverbindungen. 2a) Aliphatische Diazoverbindungen. Wie bei den Ammoniakderivaten (S. 274) ausgeführt worden ist, besteht ein charakteristischer Unterschied zwischen den aromatischen und aliphatischen primären Aminen in deren Verhalten gegen salpetrige Säure. Während bei dieser Reaktion, die man als „Diazotierung" bezeichnet, NH_2-Gruppen, welche direkt an einem aromatischen oder auch heterozyklischen Kern haften, bei genügender Vorsicht zunächst regelmäßig Diazoniumsalze und dann aus diesen Diazoverbindungen liefern, gehen aliphatisch gebundene NH_2-Gruppen mit salpetriger Säure im allgemeinen sofort unter Stickstoffentwickelung in Hydroxylgruppen über. Die einzige Ausnahme, die man hiervon kennt, tritt ein, wenn die NH_2-Gruppe benachbart zu einer veresterten Carboxylgruppe steht. Die Ester der α-Aminofettsäuren liefern mit salpetriger Säure zunächst Verbindungen, welche zwei Stickstoffatome im Molekül enthalten und die man hiernach und nach der analogen Bildungsweise Diazoverbindungen nennt, obwohl sie vielleicht anders konstituiert sind als die der aromatischen Reihe angehörigen eigentlichen Diazoverbindungen (vgl. S. 748).

Aliphatische Verbindungen vom Typus der Diazoniumverbindungen $Alk-N\langle\begin{smallmatrix}X\\ \\ N\end{smallmatrix}$ (mit $\equiv N$) sind gar nicht bekannt und auch Verbindungen, welche den aromatischen Diazoverbindungen ganz analog gebaut sind, kennt man nur in ganz vereinzelten Fällen, die der Vollständigkeit wegen kurz erwähnt werden mögen. Hierher gehört das durch vorsichtige Oxydation der Aethylhydrazinsulfosäure entstehende Kaliumsalz der Diazoäthansulfosäure,

$$C_2H_5.NH-NH.SO_3K$$
$$\xrightarrow{O} C_2H_5.N=N.SO_3K$$

und das beim Diazomethan noch zu erwähnende Diazomethankalium, das auch als methylazosaures oder methyldiazosaures Kalium bezeichnet wird und die Formel $CH_3.N=N.OK$ hat. Letzteres Salz ist das einzige bekannte „Diazotat" (vgl. S. 752) der aliphatischen Reihe. Beide erwähnten Verbindungen sind äußerst unbeständig und zersetzen sich explosionsartig.

Aber auch von den gewöhnlichen aliphatischen Diazoverbindungen sind nur recht wenige Repräsentanten bekannt, nämlich außer den wenigen durch direkte Diazotierung zugänglichen α-Diazofettsäureestern nur

noch die auf andere Weise erhältlichen Verbindungen Diazomethan und Diazoäthan. Die gewöhnlichen aliphatischen Diazoverbindungen sind, wie schon erwähnt, anders konstituiert, als die aromatischen Diazoverbindungen, indem ihre Diazogruppe — N = N — vielleicht beiderseitig an das gleiche Kohlenstoffatom gebunden ist. Sie hätten danach also die Konstitution $\overset{X}{\underset{Y}{>}}C\langle\overset{N}{\underset{N}{\|}}$.

Beim Diazoessigester hat man übrigens beobachtet, daß derselbe unter Umständen in einen isomeren Ester, den sogenannten Isodiazoessigester übergeht, den man die Konstitution $C_2H_5OOC - C\langle\overset{NH}{\underset{N}{|}}$ zuerteilen kann (s. S. 749). Die Formeln des Diazoessigesters und Isodiazoessigester stehen im gleichen Verhältnis zueinander, wie die gewisser Azoverbindungen zu denen von Phenylhydrazonen (s. S. 766), doch handelt es sich hier nicht um Tautomerie sondern um Desmotropie, da beide Formen isolierbar sind und verschiedenes Verhalten zeigen.

Neuerdings ist von Angeli und Thiele unter Anführung sehr plausibler Gründe für die aliphatischen Diazokörper eine andere Konstitution $\overset{X}{\underset{Y}{>}}C:N:N$ vorgeschlagen worden. Nach dieser Formel sind die aliphatischen Diazokörper den aromatischen Diazoniumsalzen (s. S. 751) fast analog konstituiert, indem sie ebenfalls ein fünfwertiges Stickstoffatom enthalten. Alle bekannten Reaktionen der aliphatischen Diazokörper stehen mit der neuen Formel sehr gut in Einklang, zum Teil sogar wesentlich besser als mit der bisher angenommenen, doch ist der Thielesche Vorschlag noch so neu, daß sich andere Chemiker dazu noch nicht haben äußern können, so daß vorläufig noch die alte Formel als die allgemein gebrauchte beibehalten werden soll.

Darstellung aliphatischer Diazoverbindungen. Die einfachsten hierher gehörigen Verbindungen Diazomethan

$$CH_2\langle\overset{N}{\underset{N}{\|}} \quad \text{oder } CH_2:N:N$$

und das analoge Diazoäthan lassen sich, wie schon erwähnt, nicht durch „Diazotierung" darstellen. Man erhält die Diazoparaffine aus den Nitrosoverbindungen methylierter oder äthylierter Säureamide mit Alkalien. Am bequemsten gewinnt man Diazomethan aus Nitrosomethylurethan mit starkem Alkali. Als Zwischenprodukt entsteht hierbei das schon (S. 747) erwähnte Kaliummethyldiazotat, das mit Wasser heftig in Diazomethan und Kaliumhydroxyd zerfällt.

$$CH_3.N\overset{NO}{\underset{CO_2C_2H_5}{}} \longrightarrow CH_3.N{=}NOK$$

Nitrosomethylurethan — Kaliummethyldiazotat

$$\longrightarrow CH_2\overset{N}{\underset{N}{\|}} \quad \text{oder } CH_2:N:N$$

Diazomethan

Aus letzterer Umsetzung kann man schließen, daß die aliphatischen Diazoverbindungen innere Anhydride der unbeständigen Diazohydrate

$$\overset{X}{\underset{Y}{>}}C\langle\overset{N=NOH}{\underset{H}{}}$$

sind, welche letzteren die wahren Analoge der aromatischen Diazoverbindungen wären.

Diazomethan entsteht auch noch bei der Reduktion von Methylnitroamin und aus Methyldichloramin und Hydroxylamin.

$$CH_3.NCl_2 + H_2NOH \longrightarrow [CH_3.N = NOH]$$

$$\longrightarrow CH_2\overset{N}{\underset{N}{\|}} \quad \text{oder } CH_2:N:N$$

Die Diazofettsäureester erhält man dagegen durch „Diazotierung", d. h. durch Einwirkung von Kaliumnitrit auf die Chlorhydrate der α-Aminofettsäureester.

$$HCl,H_2N.CH_5.CO_2C_2H_5 + NO_2K$$

Glykokollesterchlorhydrat

$$= \overset{N}{\underset{N}{\|}}\rangle CH.CO_2C_2H_5 \quad (\text{oder } N:N:CH.CO_2C_2H_5)$$

Diazoessigester

$$+ KCl + 2H_2O.$$

Ebenso wie die einfachen α-Aminoester lassen sich auch Di- und Polypeptidester diazotieren, wenn sie noch die Gruppe NH_2. CH_2.CO — enthalten. β- und γ-Aminosäureester liefern dagegen keine Diazoester.

Die Natriumsalze der Diazofettsäuren entstehen auch aus den sogenannten Isonitraminfettsäuren durch Reduktion mit Natriumamalgam.

Eigenschaften und Umsetzungen der aliphatischen Diazoverbindungen. Das Diazomethan ist ein geruchloses gelbes sehr giftiges Gas, das sich leicht verflüssigen läßt und bei ca. 0° siedet. Es explodiert beim Erhitzen auf 200° heftig. Die Diazoessigester sind eigentümlich riechende, gelbe, bei tiefer Temperatur erstarrende und im Vakuum ungesetzt destillierbare Flüssigkeiten, die in der Hitze in Stickstoff und Fumarsäureester zerfallen und durch konzentrierte Schwefelsäure zur Explosion gebracht werden können.

Die Diazofettsäureester lassen sich durch Ammoniak in die entsprechenden Diazofettsäureamide überführen. Diese, sowie

die aus α-Aminonitrilen durch Diazotierung erhältlichen Diazofettsäurenitrile sind ziemlich beständig, während die freien Diazofettsäuren sofort zerfallen. Diazoessigester hat schwachsaure Eigenschaften, indem das Wasserstoffatom der CHN_2-Gruppe bei der Behandlung mit wasserfreien Alkoholaten durch Alkalimetalle ersetzt werden kann: Hierbei lagert sich aber der Diazoessigester in den desmotropen Isodiazoessigester

$$\begin{matrix} HN & \\ | & \diagup C-CO_2C_2H_5 \\ N & \end{matrix}$$

um (s. S. 748 und 750). Nach der neuen Formulierung (s. S. 748) dürfte sich dieser Vorgang vielleicht folgendermaßen abspielen.

$$C_2H_5O_2C.CH:N:N \longrightarrow C_2H_5O_2C.C:N:NH$$

Der freie Isodiazoessigester kann aus seinen Salzen abgeschieden werden, ist aber leicht zersetzlich. Die Formeln der beiden isomeren Ester gehen daraus hervor, daß der Diazoester durch Hydrolyse in Stickstoff und Glycolsäure (I), der Isodiazoester aber in Hydrazin und Oxalsäure (II) übergeführt wird,

$$\text{I}\ C_2H_5O_2C.CH\begin{matrix}N\\ N\end{matrix} + \begin{matrix}OH\\ H\end{matrix} = C_2H_5O_2C.CH\begin{matrix}OH\\ H\end{matrix} + N_2$$

$$\text{II}\ C_2H_5O_2C.C\begin{matrix}NH\\ |\\ N\end{matrix} + \begin{matrix}HOH\\ OH_2\end{matrix} = C_2H_5O_2C.C\begin{matrix}OH\\ O\end{matrix} + \begin{matrix}NH_2\\ |\\ NH_2\end{matrix}$$

oder nach der neuen Formulierung vielleicht

$$\text{I}\ C_2H_5O_2C.CH:N:N + H.OH = \left| \begin{matrix} C_2H_5O_2C.CH.N:N \\ | \qquad\quad | \\ H \qquad\quad OH \end{matrix} \right| = C_2H_5O_2C.CH_2OH + N_2$$

$$\text{II}\ C_2H_5O_2C.CN:NH + 2HOH = C_2H_5O_2C.COOH + H_2N.NH_2.$$

Das dem Diazomethan entsprechende Isodiazomethan $HC\begin{matrix}NH\\ |\\ N\end{matrix}$ scheint in freier Form nicht existenzfähig zu sein, läßt sich aber durch Derivate nachweisen.

Die der Diazogruppe eigentümlichen Reaktionen der aliphatischen Diazoverbindungen lassen sich, ähnlich wie bei den aromatischen Diazokörpern, in zwei Gruppen trennen, je nachdem bei ihnen die Diazogruppe erhalten bleibt oder als freier Stickstoff abgespaltet wird (vgl. S. 751).

Reaktionen unter Stickstoffabspaltung gehen vor sich, wenn man die Diazoverbindungen mit Halogen oder mit Substanzen umsetzt, welche ein bewegliches Wasserstoffatom besitzen, wie Wasser, anorganische und organische Säuren, Phenole, Alkohole, aromatische Amine oder Aldehyde. Die Reaktion verläuft stets so, als ob unter Stickstoffabspaltung ein Kohlenstoffatom mit zwei freien Affinitäten

$$\begin{matrix}X\\ Y\end{matrix} C \begin{matrix}N\\ N\end{matrix} \longrightarrow \begin{matrix}X\\ Y\end{matrix} C + N_2$$

entstände, an welche dann das mit der Diazoverbindung zusammengebrachte Agens addiert wird. Es entstehen also z. B. aus Diazoessigester (I) mit Halogen Dihalogenfettsäureester (II), mit Wasser Glykolsäureester (III), mit Halogenwasserstoff Halogenfettsäureester (IV), mit organischen Säuren Acylglykolsäureester (V), mit Alkoholen und Phenolen Alkyloxyessigester (VI), mit Anilin Anilinofettsäureester (VII) und mit Aldehyden Ketosäureester (VIII).

$$\text{I}\ \begin{matrix}C_2H_5O_2C\\ H\end{matrix} C \begin{matrix}N\\ N\end{matrix} \qquad \text{II}\ \begin{matrix}C_2H_5O_2C\\ H\end{matrix} C \begin{matrix}J\\ J\end{matrix}$$

$$\text{III}\ \begin{matrix}C_2H_5O_2C\\ H\end{matrix} C \begin{matrix}HO\\ H\end{matrix} \qquad \text{IV}\ \begin{matrix}C_2H_5O_2C\\ H\end{matrix} C \begin{matrix}H\\ Cl\end{matrix}$$

$$\text{V}\ \begin{matrix}C_2H_5O_2C\\ H\end{matrix} C \begin{matrix}H\\ OCO.CH_3\end{matrix}$$

$$\text{VI}\ \begin{matrix}C_2H_5O_2C\\ H\end{matrix} C \begin{matrix}H\\ OAlk\end{matrix}$$

$$\text{VII}\ \begin{matrix}C_2H_5O_2C\\ H\end{matrix} C \begin{matrix}H\\ NHC_6H_5\end{matrix}$$

$$\text{VIII}\ \begin{matrix}C_2H_5O_2C\\ H\end{matrix} C \begin{matrix}H\\ CO.C_6H_5\end{matrix}$$

Alle die eben angeführten Reaktionen lassen sich ebensogut erklären, wenn man für die aliphatischen Diazoverbindungen die neue Thielesche Formulierung (s. S. 748) annimmt. Hiernach würden die Diazoverbindungen das betreffende Agens z. B. Wasser zunächst addieren

$$\begin{matrix}X\\ Y\end{matrix} C:N:N + H_2O = \left[\begin{matrix}X & & \\ & C - N = N & \\ Y & | \qquad\quad | & \\ & H \qquad\quad OH & \end{matrix} \right]$$

Die auf diese Weise primär entstehenden Körper wären den aromatischen Diazoverbindungen (s. S.752) völlig analog konstituiert, sind aber anscheinend noch viel unbeständiger als diese und zerfallen sofort unter Abspaltung von Stickstoff.

$$\left[\begin{matrix}X & & \\ & C - N = N & \\ Y & | \qquad\quad | & \\ & H \qquad\quad OH & \end{matrix} \right] \longrightarrow \begin{matrix}X\\ Y\end{matrix} C \begin{matrix}H\\ OH\end{matrix} + N_2$$

Wie man sieht, tritt bei Annahme der neuen Konstitutionsformeln die durchweg beobachtete Analogie zwischen aliphatischen und aromatischen Diazoverbindungen viel besser hervor.

In völlig analoger Weise reagiert Diazomethan so als ob es freies „Methylen" $H_2C <$ wäre, d. h. es führt die sich an seine freien Valenzen anlagernden Säuren, Phenole, Alkohole oder Amine in deren Methylester, -äther usw., Aldehyde aber in Methylketone über. Infolgedessen ist das Diazomethan als Methylierungsmittel wertvoll und zwar um so mehr als es häufig schon in der Kälte glatt reagiert und dadurch die Methylierung empfindlicher Körper, z. B. labiler tautomerer Modifikationen ohne Konstitutionsänderung erlaubt.

Reaktionen ohne Stickstoffabspaltung. Daß der Diazoessigester durch Alkalialkoholat in einen Isodiazoessigester umgelagert wird, ist schon (S. 749) erwähnt worden. In ähnlicher Weise liefert er mit konzentrierter Natronlauge das Natriumsalz der sogenannte Bisdiazoessigsäure, die aber in Wirklichkeit eine Bis-iso-diazoessigsäure ist, da sie bei der Hydrolyse Hydrazin und Oxalsäure liefert. Durch vorsichtige Reduktion kann man Diazoessigester in Salze der Hydraziessigsäure überführen, die bei der Hydrolyse ebenfalls Hydrazin liefert,

$$\overset{N}{\underset{N}{\|}}>CH.CO_2C_2H_5 \xrightarrow{2H} \overset{HN}{\underset{HN}{|}}>CH-CO_2H \xrightarrow{H_2O} \overset{H_2N}{\underset{H_2N}{|}} + OCH.CO_2H$$

oder nach der neueren Formulierung

$$N\!:\!N\!:\!CH.CO_2C_2H_5 \xrightarrow{2H} \underset{H}{N}.\underset{N}{N}\!:\!CH.CO_2C_2H_5 \xrightarrow{H_2O} H_2N.NH_2 + OCH.CO_2H.$$

Diese Reaktionen sind wichtig für die Darstellung des Hydrazins (vgl. die Artikel „Ammoniakderivate" und „Stickstoff"). Außerdem neigen die aliphatischen Diazoverbindungen dazu, unter Lösung der einen Stickstoff-Kohlenstoffbindung wie ein

$$\overset{X}{\underset{Y}{}}C\;N=N-$$

Komplex mit zwei freien Valenzen zu reagieren und in dieser Form durch Umlagerung, Polymerisation oder Anlagerung an andere ungesättigte Verbindungen in beständigere heterozyklische Verbindungen überzugehen. So lagert sich Diazoacetamid in Triazolon

$$\overset{N}{\underset{N}{\|}}>CH-CONH_2 \longrightarrow \left[\begin{matrix} N- & NH_2 \\ \| & \\ N-CH- & CO \end{matrix}\right] \longrightarrow \begin{matrix} N- & -NH \\ \| & | \\ N-CH_2- & CO \end{matrix}$$

um, Diazomethan polymerisiert sich am Sonnenlicht zu C-Dihydrotetrazin

$$\overset{N}{\underset{N}{\|}}>CH_2 + H_2C<\overset{N}{\underset{N}{\|}} \longrightarrow \left[\begin{matrix} N- & & -CH_2-N \\ \| & + & \| \\ N-CH_2- & & -N \end{matrix}\right] \longrightarrow \begin{matrix} N-CH_2-N \\ \| \qquad \| \\ N-CH_2-N \end{matrix}$$

und auch die eben erwähnte Bisdiazoessigsäure ist ein Derivat eines Dihydrotetrazins. An ungesättigte Kohlenwasserstoffe und ungesättigte Ester addieren sich Diazokörper unter Bildung von Pyrazolinen. So liefert Diazomethan mit Aethylen Pyrazolin und Diazoessigester liefert z. B. mit Acrylsäureester Pyrazolindicarbonsäureester.

$$\begin{matrix} C_2H_5O_2C.C.H \\ N=N \end{matrix} + \begin{matrix} CH_2 \\ \| \\ CH.CO_2C_2H_5 \end{matrix} \longrightarrow \left[\begin{matrix} C_2H_5O_2C.CH - CH_2 \\ N=N-CH.CO_2C_2H_5 \end{matrix}\right] \longrightarrow \begin{matrix} C_2H_5O_2C.C \qquad CH_2 \\ N-NH-CH.CO_2C_2H_5 \end{matrix}$$

Alle die so entstehenden Körper werden bei den heterozyklischen Verbindungen näher behandelt werden. Hier möge nur des Zusammenhanges wegen erwähnt werden, daß die Pyrazolincarbonsäureester beim Erhitzen Stickstoff abspalten und in Trimethylencarbonsäureester übergehen,

$$\begin{matrix} C_2H_5O_2C.C \qquad CH_2 \\ \| \qquad\quad | \\ N-NH-CH.CO_2C_2H_5 \end{matrix} \longrightarrow N_2 + \begin{matrix} C_2H_5O_2C.CH-CH_2 \\ | \\ CH.CO_2C_2H_5 \end{matrix}$$

so daß man die Diazoester indirekt auch zur Synthese von „isozyklischen" Verbindungen verwenden kann. In offenbar analoger Reaktion liefert Diazoessigester beim Erhitzen mit Benzol und dessen Homologen die sogenannten Norcaradiencarbonsäureester (Benzotrimethylencarbonsäureester).

$$C_6H_6 + \overset{N}{\underset{N}{\|}}>CH.CO_2C_2H_5 = C_6H_6>CH.CO_2C_2H_5 + N_2$$

Schließlich sei noch erwähnt, daß Diazoessigester oder Diazoacetamid mit Hydrazin das Hydrazid der Azidoessigsäure eines Derivats der Stickstoffwasserstoffsäure liefert (s. S. 771).

$$C_2H_5O_2C.CH<\overset{N}{\underset{N}{\|}} + 2H_2N.NH_2 =$$

$$H_2N.NH.CO.CH_2.N\begin{array}{c}N\\ \|\\ N\end{array} + NH_3 + C_2H_5OH$$

oder nach der neueren Formulierung

$$C_2H_5O_2C.CH : N : N + 2H_2N.NH_2 = H_2N.NH.CO.CH_2.N : N : N + NH_3 + C_2H_5OH.$$

2b) Aromatische Diazoniumsalze und Diazoverbindungen. Wie schon erwähnt, gehen NH_2-Gruppen, welche direkt an einem aromatischen oder auch heterozyklischen Kern haften, im Gegensatz zu aliphatisch gebundenen Aminogruppen bei der „Diazotierung", d. h. bei der Behandlung mit freier salpetriger Säure ganz allgemein zunächst in unbeständige, zuerst von Peter Grieß entdeckte Derivate über, in denen sowohl das Stickstoffatom der Aminogruppe als auch das der salpetrigen Säure noch vorhanden sind und welche außerdem noch, je nach dei Art der bei der Diazotierung noch vorhanden gewesenen Mineralsäure, einen einwertigen Säurerest enthalten. Ueber die Konstitution diesei bei der Diazotierung primär entstehenden Verbindungen ist lange diskutiert worden, doch nimmt man jetzt allgemein an, daß dieselben neben einem dreiwertigen auch ein fünfwertiges Stickstoffatom enthalten. Diese zuerst von Blomstrand angenommene aber erst viel später von Hantzsch bewiesene Auffassung gründet sich namentlich auf der Leitfähigkeit und dem kryoskopischen Verhalten der fraglichen Verbindungen, welche danach den Ammoniumsalzen analog gebaut sind. Diese Erkenntnis findet ihren Ausdruck darin, daß man die genannten Körper nicht mehr wie früher als Diazoverbindungen sondern als Diazoniumsalze bezeichnet (vgl. S. 746). Der Vorgang bei des Einwirkung der salpetrigen Säure auf die Salze primärer aromatischer Amine stellt sich also folgendermaßen dar.

$$\begin{array}{l}C_6H_5.N\begin{array}{l}H\\H+\\H\end{array}\begin{array}{l}O\\ \quad\searrow N\\HO\end{array}\\ \;\;|\\ \;\;Cl\end{array} = \begin{array}{l}C_6H_5.N{:}N+2H_2O\\ \qquad\;\;|\\ \qquad\;\;Cl\end{array}$$

Anilinchlorhydrat Benzoldiazoniumchlorid

$$\begin{array}{l}C_{10}H_7.N\begin{array}{l}H\\H+\\H\end{array}\begin{array}{l}O\\ \quad\searrow N\\HO\end{array}\\ \;\;|\\ \;\;ONO_2\end{array} = \begin{array}{l}C_{10}H_7.N{:}N+2H_2O\\ \qquad\;\;|\\ \qquad\;\;ONO_2\end{array}$$

Naphtylaminnitrat Naphtalindiazoniumnitrat

Es sei hier erwähnt, daß man früher den Vorgang bei der Diazotierung und die Konstitution der entstehenden Verbindungen nach dem Vorschlag von Kekulé im Sinne folgender Formeln auffaßte.

$$\underset{\text{Anilinchlorhydrat}}{C_6H_5.NH_2.HCl} + O{:}N.OH = [C_6H_5.N{:}N.OH + HCl + H_2O] = \underset{\text{Diazobenzolchlorid,}}{C_6H_5.N{:}N.Cl} + 2\,H_2O$$

Man findet diese Auffassung, die jetzt endgültig als falsch bewiesen erscheint, in älteren Lehrbüchern und bezeichnet die bei der Diazotierung primär entstehenden Verbindungen auch heute noch vielfach aus alter Gewohnheit als Diazosalze (Diazobenzolchlorid, Diazonaphtalinnitrat usw.), doch ist ihre Benennung als Diazoniumsalze unbedingt vorzuziehen.

Die Diazoniumsalze, von deren Darstellung und Umsetzungen später noch ausführlich die Rede sein wird, sind ziemlich unbeständige und namentlich gegen Temperaturerhöhung recht empfindliche Körper, die man daher auch nur bei relativ niedrigen Temperaturen erhalten kann. Sie sind aber sehr reaktionsfähig und können als Zwischenprodukte zur Darstellung zahlreicher stickstoffreier und stickstoffhaltiger aromatischer Verbindungen benutzt werden. Sie sind infolgedessen für zahlreiche präparative und theoretische Zwecke, so namentlich für die Farbstofftechnik von allergrößter Bedeutung.

Die Umsetzungen der Diazoniumsalze zerfallen in zwei große Gruppen, von denen die erste zunächst als eine einfache Stickstoffabspaltung aufgefaßt werden kann. Unter gewissen Bedingungen liefert z. B. das Benzoldiazoniumchlorid Chlorbenzol und freien Stickstoff

$$\begin{array}{l}C_6H_5.N\equiv N\\ \qquad\;\;|\\ \qquad\;\;Cl\end{array} \longrightarrow C_6H_5.Cl + N_2$$

und in analoger Weise können andere Diazoniumsalze zerfallen. Bei der zweiten Gruppe von Umsetzungen bleibt dagegen die aus zwei Stickstoffatomen bestehende Gruppe im Molekül erhalten. Besonders wichtig ist die Fähigkeit der Diazoniumsalze oder ihrer Umwandlungsprodukte, sich in alkalischer oder neutraler Lösung mit Phenolen (und anderen Verbindungen) zu substituierten Azoverbindungen, den Grundkörpern der wichtigen Azofarbstoffe zu vereinigen. Diesen Vorgang bezeichnet man allgemein als „Kuppelung". So kann man z. B. Benzoldiazoniumchlorid in alkalischer Lösung mit Phenol zu Oxyazobenzol „kuppeln".

$$\begin{array}{l}C_6H_5.N\equiv N\\ \qquad\;\;|\\ \qquad\;\;Cl\end{array} + C_6H_5.OH + KOH$$

$$= C_6H_5.N = N.C_6H_4.OH + KCl + H_2O.$$

Die beiden Gruppen von Reaktionen werden später ausführlicher besprochen werden. Zu ihrem Verständnis ist es aber nötig, vorher das Verhalten der Diazoniumsalze gegen Alkali nach den jetzt herrschenden theoretischen Anschauungen zu besprechen.

Die Diazoniumsalze verhalten sich den Ammoniumsalzen analog. Versetzt man eine Lösung des Benzoldiazoniumchlorids oder

-sulfats mit Silberoxyd oder der genau äquivalenten Menge Baryumhydroxyd, so erhält man eine stark alkalische Lösung, welche offenbar das den Ammoniumhydroxyden entsprechende Diazoniumhydroxyd enthält.

$$\underset{\substack{|\\ Cl}}{C_6H_5.N\equiv N} + AgOH = \underset{\substack{|\\ OH}}{C_6H_5.N\equiv N} + AgCl$$

Benzoldiazoniumchlorid — Benzoldiazoniumhydroxyd

Diese Diazoniumhydrate sind aber äußerst unbeständige Körper und zeigen namentlich gegen Kaliumhydroxyd ein sehr charakteristisches Verhalten, indem sie mit demselben ein Kaliumsalz von der Zusammensetzung $C_6H_5N_2OK$ bilden. Dieses Kaliumsalz scheidet sich aus der konzentrierten Lösung ab, es entsteht aber auch, wie die Leitfähigkeitsbestimmungen deutlich zeigen, in verdünnter Lösung. Das Kaliumsalz kann sich nun nicht direkt von dem stark basischen Diazoniumhydroxyd ableiten, sondern letzteres muß sich vor der Salzbildung in einen Körper sauren Charakters umgelagert haben, dem man mit Hantzsch eine Struktur im Sinne der alten Kekuléschen Diazoformel zuerteilen wird. Der Diazoniumhydrat lagert sich also in ein Diazohydrat um und letzteres bildet mit KOH ein Salz, das man als Diazotat bezeichnet.

$$\underset{\substack{|\\ OH}}{C_6H_5.N\equiv N} \longrightarrow C_6H_5.N=N.OH$$

Benzoldiazoniumhydrat — Diazobenzolhydrat

$$\longrightarrow C_6H_5.N=N.OK$$

Kaliumbenzoldiazotat.

Bei Zusatz von Mineralsäuren gehen diese Diazotate wieder in die Diazoniumsalze über, d. h. die besprochene Umlagerung findet im umgekehrten Sinne statt. Die frisch dargestellten Diazotate zeigen nun die oben erwähnte Eigenschaft, zu „kuppeln", sie sind aber wiederum ziemlich unbeständig und lagern sich, teils schon bei gewöhnlicher Temperatur, teils beim Erhitzen in andere Kaliumsalze, die sogenannten Isodiazotate, um, welche in alkalischer Lösung nicht, oder nur schwierig „kuppeln". Von diesen stabileren Salzen nimmt man jetzt allgemein an, daß sie mit den labileren, kupplungsfähigen Diazotaten stereoisomer sind.

Auf das Wesen dieser Stereoisomerie des Stickstoffs kann an dieser Stelle nicht noch einmal ausführlich eingegangen werden. Sie ist in dem Kapitel „Ammoniakderivate" bei der Stereoisomerie der Oxime (S. 294) eingehend besprochen worden.

Aus Gründen, die den bei den stereoisomeren Oximen maßgebend gewesenen analog sind, muß man annehmen, daß die primär entstehenden, labilen und kuppelungsfähigen Diazotate die Syn-Konfiguration, die sekundär entstehenden, stabilen, nicht kuppelnden Diazotate aber die Anti-Konfiguration besitzen. Die Isomerie dieser beiden Reihen von Salzen stellt sich also im Sinne folgender beiden Formeln vor:

$$\begin{matrix} C_6H_5-N \\ \| \\ KO-N \end{matrix} \qquad\qquad \begin{matrix} C_6H_5-N \\ \| \\ N-OK \end{matrix}$$

Syn-Diazotat. Labil, kuppelnd. — Anti-Diazotat. Stabil, nicht kuppelnd.

Wenn man die Lösung eines Anti-Diazotats mit Mineralsäure versetzt, so wird nicht wie bei den Syndiazotaten das Diazoniumsalz zurückgebildet, sondern es wird das dem Antidiazotat entsprechende saure Antidiazohydroxyd in Freiheit gesetzt.

$$\begin{matrix} C_6H_5-N \\ \| \\ N-OK \end{matrix} + HCl = \begin{matrix} C_6H_5-N \\ \| \\ N.OH \end{matrix} + KCl$$

Antidiazotat — Antidiazohydrat

Diese Antidiazohydrate sind aber wiederum sehr unbeständig, so daß ihre Isolierung nur in wenigen Fällen möglich ist. Sie lagern sich meist sofort in die neutralen „Nitrosamin"-Formen um, aus denen aber mit Alkali unter Rückumlagerung momentan die Antidiazotate regeneriert werden.

$$\begin{matrix} C_6H_5-N \\ \| \\ N-OH \end{matrix} \longleftrightarrow \begin{matrix} C_6H_5-N-H \\ | \\ N=O \end{matrix}$$

Antidiazohydrat und „Nitrosamin" stehen zueinander in dem Verhältnis desmotroper oder tautomerer Formen. Beispiele für solche Tautomerien sind ebenfalls in dem Kapitel „Ammoniakderivate" bei den Säureamiden, Hydroxamsäuren und anderen Verbindungen ausführlicher besprochen worden. Hier möge nur noch erwähnt werden, daß man die jetzt als stereoisomer erkannten beiden Formen der Diazotate früher als tautomere Salze im Sinne der beiden Formeln

$$C_6H_5-N=N.OK \quad \text{und} \quad C_6H_5-N\overset{K}{\diagup}N=O$$

Diazotat — Isodiazotat

angesehen hat. Diese Formulierung kann aber nicht richtig sein, weil beide Formen von Diazotaten bei Zusatz von Mineralsäuren zunächst saure Hydroxylverbindungen liefern.

Die Reihe von Umlagerungen, die man nach dem jetzigen Stand der Chemie für die Diazoverbindungen annehmen muß, stellt sich also folgendermaßen dar:

$$\begin{matrix} X.N-Cl \\ N \end{matrix} \underset{HCl}{\overset{KOH}{\rightleftarrows}} \begin{matrix} X.N-OH \\ N \end{matrix}$$

Diazoniumsalz — Diazoniumhydrat

$$\xrightarrow{KOH} \quad X.N \quad \xrightarrow{KOH}$$
$$\underset{HCl}{\longleftarrow} \quad HO-N \quad \underset{HCl}{\longleftarrow}$$

Syn-Diazohydrat
nicht isolierbar

$$\underset{HCl}{\overset{KOH}{\rightleftarrows}} \quad \begin{matrix} X.N \\ \| \\ KO.N \end{matrix} \longrightarrow \begin{matrix} X.N \\ \| \\ N-OK \end{matrix}$$

Syn-Diazotat Anti-Diazotat

$$\underset{KOH}{\overset{HCl}{\rightleftarrows}} \quad \begin{matrix} X.N \\ \| \\ N-OH \end{matrix} \quad \underset{KOH}{\overset{HCl}{\rightleftarrows}}$$

Anti-Diazohydrat

$$\underset{KOH}{\overset{HCl}{\rightleftarrows}} \quad \begin{matrix} X-N.H \\ | \\ N=O \end{matrix} \quad \xrightarrow{HCl} \quad \begin{matrix} X.N-Cl \\ ||| \\ N \end{matrix}$$

Nitrosamin Diazoniumsalz.

Die primären Nitrosamine werden von wässerigen Säuren zum Teil allmählich unter Abspaltung von salpetriger Säure zersetzt, zum Teil aber auch, namentlich in großer Verdünnung in Diazoniumsalze zurückverwandelt.

Derartige Umlagerungen der Diazoniumsalze gehen aber offenbar nicht nur bei Alkalizusatz sondern bis zu einem gewissen Grade auch in saurer Lösung vor sich, und man muß sie auch den unter Stickstoffabspaltung vor sich gehenden Umsetzungen der Diazokörper, so der obenerwähnten (S. 751) Bildung von Chlorbenzol aus Benzoldiazoniumchlorid (vgl. auch S. 756) zugrunde legen. Bei dieser Reaktion lagert sich bei Gegenwart überschüssiger Salzsäure das Diazoniumchlorid anscheinend zunächst in Syn-Diazobenzolchlorid um, und dieses spaltet beim Erhitzen Stickstoff ab, wobei sich Benzolrest und Chlor, da sie sich räumlich nahe stehen (vgl. die Umsetzungen der stereoisomeren Oxime im Artikel „Ammoniakderivate“ S. 294), leicht miteinander vereinigen können.

$$\begin{matrix} C_6H_5 & & Cl \\ | & & | \\ N \equiv N + & & | \\ | & & | \\ Cl & & H \end{matrix} = \begin{matrix} C_6H_5 & Cl \\ | & | \\ N = & N \end{matrix} = C_6H_5-Cl + N_2$$

Diazoniumchlorid Syndiazochlorid

Aber auch diese Syn-Diazoverbindungen sind labil und lagern sich leicht in stabilere Anti-Diazoverbindungen um.

$$\begin{matrix} C_6H_5.N \\ \| \\ Cl.N \end{matrix} \longrightarrow \begin{matrix} C_6H_5.N \\ \| \\ N.Cl \end{matrix}$$

Syndiazochlorid Antidiazochlorid

Im Anti-Diazobenzolchlorid stehen Benzolrest und Chlor räumlich weit voneinander entfernt und können sich daher nicht mehr miteinander vereinigen.

Daß diese theoretische Auffassung richtig ist, konnte Hantzsch in einigen Fällen beweisen. Wenn man nämlich die Lösung eines Diazoniumchlorids mit Cyaniden versetzt, so erhält man in analoger Reaktion Cyanbenzol (Tolunitril, vgl. S. 756), indem sich Benzolrest und Cyan genau ebenso miteinander vereinigen. wie vorher Benzolrest und Chlor. In erster Phase der Reaktion wird hierbei einfach das Chloratom des Diazoniumchlorids durch die Cyangruppe ersetzt, d. h. es entsteht ein Diazoniumcyanid. Dasselbe ließ sich isolieren, als man an Stelle des Benzolrestes einen Anisolrest (Methoxybenzolrest) setzte.

$$\begin{matrix} CH_3O.C_6H_4.NH_3 \\ | \\ Cl \end{matrix} + HNO_2$$

Anisidinchlorhydrat

$$= \begin{matrix} CH_3O.C_6H_4.N \equiv N \\ | \\ Cl \end{matrix} + 2H_2O$$

Anisoldiazoniumchlorid

$$\begin{matrix} CH_3O.C_6H_4.N \equiv N \\ | \\ Cl \end{matrix} + KCN$$

$$= \begin{matrix} CH_3O.C_6H_4.N \equiv N \\ | \\ CN \end{matrix} + KCl$$

Anisoldiazoniumcyanid.

Daß dieser Körper wirklich ein Diazoniumcyanid d. h. eine salzartige Verbindung ist, geht daraus hervor, daß er sich ähnlich verhält wie Cyankalium, nämlich in wässeriger Lösun alkalisch reagiert, den elektrischen Strom leitet, und wasserlöslich sowie farblos ist, Dagegen erhält man ein gelbgefärbtes Zwischenprodukt von durchaus anderem Charakter, wenn man p-Chlorbenzoldiazoniumchlorid mit Cyansalzen behandelt. Diese Verbindung, welche ihrem ganzen Verhalten nach kein Diazoniumsalz sein kann, entwickelt in Berührung mit Kupferpulver (vgl. S. 756) lebhaft Stickstoff und geht in p-Chlortolunitril über. Sie stellt offenbar das Syn-Diazocyanid vor, denn sie ist unbeständig und lagert sich leicht in eine isomere Verbindung — das Anti-Diazocyanid — um, welche gegen Kupferpulver unempfindlich ist, d. h. kein p-Chlortolunitril liefert. Es sind also folgende Umsetzungen vor sich gegangen.

$$\begin{matrix} Cl.C_6H_4.N-Cl \\ ||| \\ N \end{matrix} + KCN = \begin{matrix} Cl.C_6H_4.N-CN \\ ||| \\ N \end{matrix} + KCl$$

p-Chlorbenzoldiazonium chlorid; p-Chlorbenzoldiazoniumcyanid (Nicht isolierbar)

$$\begin{matrix} Cl.C_6H_4 & & CN \\ | & & | \\ N \equiv N + & & | \\ | & & | \\ CN & & K \end{matrix} \longrightarrow \begin{matrix} Cl.C_6H_4 & CN \\ | & | \\ N = & N \end{matrix} \longrightarrow \begin{matrix} Cl.C_6H_4 \\ | \\ N=N \\ | \\ CN \end{matrix}$$

p-Chlorbenzol-syn-diazocyanid; p-Chlorbenzolanti-diazocyanid.

Darstellung der Diazoniumsalze. Die Diazoniumsalze entstehen, wie schon gesagt, bei der Einwirkung freier salpetriger Säure auf die Salze primärer aromatischer Amine. Da sie aber gegen Temperaturerhöhung ziemlich empfindlich sind, erhält man sie nur, wenn man während der „Diazotierung" sorgfältig kühlt. Anderenfalls gehen auch die aromatischen Amine, ebenso wie die aliphatischen (s. S. 747), direkt in die entsprechenden Hydroxylverbindungen, die Phenole, über (vgl. S. 755). Trotz ihrer Unbeständigkeit kann man die Diazoniumsalze bei genügender Vorsicht in fester Form isolieren. Da dieselben aber sehr unbeständig sind und auf Stoß oder Schlag heftig explodieren, andererseits auch nur als Zwischenprodukte praktisch wichtig sind, verzichtet man fast stets auf ihre Reindarstellung und stellt nur ihre wässerigen Lösungen her, die man dann sofort im gewünschten Sinne weiter verarbeitet. Natürlich kann man in gleicher Weise, wie man aus Anilinchlorhydrat das Benzoldiazoniumchlorid erhält, aus Anilinsulfat, -nitrat usw. die Diazoniumsulfate, -nitrate usw. darstellen und auch bei den Salzen irgendwelcher anderer aromatischer, primärer Amine verläuft die Diazotierung genau ebenso wie beim Anilin.

Bei den Diaminen ist zu bemerken, daß diejenigen, in denen die beiden Aminogruppen benachbart zueinander stehen, also die o-Phenylen- oder o-Naphtylendiamine, die peri-Naphtylendiamine usw. nicht in normaler Weise in Diazoniumsalze überführbar sind. Hier wird offenbar zunächst die eine Aminogruppe normal diazotiert, das entstehende Diazoniumsalz liefert aber sofort eine ringförmige Diazoaminoverbindung, ein sogenanntes Azimid (vgl. S. 759).

$$C_6H_4(NH_2)_2 \longrightarrow \left[C_6H_4\begin{matrix}NH_2\\N_2Cl\end{matrix}\right] \longrightarrow C_6H_4\begin{matrix}NH\\N\end{matrix}\!\!>\!\!N$$

m- und p-Diamine können bei Gegenwart von viel Salzsäure normal diazotiert werden, wenn stets ein großer Ueberschuß von salpetriger Säure vorhanden ist. Unter diesen Bedingungen werden beide Aminogruppen gleichzeitig diazotiert, welchen Vorgang man auch als „Tetrazotierung" bezeichnet, ebenso wie man die entstehenden Verbindungen als „Tetrazoverbindungen" benennt. Diazotiert man aber in neutraler Lösung, indem man die Lösung des Diaminsalzes mit Natriumnitrit versetzt, so entstehen aus m-Diaminen sogleich Aminoazokörper, indem die primär entstandene Diazoniumverbindung sofort mit einem zweiten Molekül m-Diamin „kuppelt" (vgl. S. 758). p-Naphtylendiamin wird von salpetriger Säure leicht zu α-Naphtochinon oxydiert.

Die festen Diazoniumsalze stellt man dar, indem man in einen Brei des zu diazotierenden Aminsalzes mit Wasser unter Eiskühlung gasförmige salpetrige Säure einleitet. Aus der erhaltenen Lösung fällt man das feste Diazoniumsalz mit einem Gemisch von Alkohol und Aether. Zweckmäßiger ist es noch, die Diazotierung so auszuführen, daß man das Aminsalz in Alkohol löst, mit einigen Tropfen konzentrierter Mineralsäure versetzt und nun unter Kühlung Amylnitrit zutropft. Auch in Eisessiglösung kann man mit Amylnitrit diazotieren. In beiden Fällen scheidet sich das Diazoniumsalz direkt kristallinisch ab. Es sei hier nochmals darauf hingewiesen, daß viele Diazoniumsalze in trockenem Zustand außerordentlich heftig explodieren.

Man hat übrigens in der Technik mit gutem Erfolg versucht, aus den Diazoniumsalzen durch Zusammenkristallisieren mit indifferenten Metallsalzen feste Präparate herzustellen, welche sich ohne Explosionsgefahr handhaben und transportieren lassen, und welche lange genug haltbar sind, um direkt als Handelsprodukt zum Zweck der Erzeugung von Azofarbstoffen in den Verkehr gebracht werden können. Hierüber existieren zahlreiche Patente (z. B. D.R.P. Nr. 94495 und 97933), die aber nur technisches Interesse haben.

In fast allen Fällen vermeidet man aber besser die Darstellung der festen Diazoniumsalze und verwendet ihre wässerigen Lösungen direkt. Zu ihrer Herstellung verwendet man an Stelle der freien salpetrigen Säure viel bequemer Natriumnitrit. Man löst das zu diazotierende Amin mit etwa 2½ Aequivalenten der betreffenden Mineralsäure in Wasser und tropft in diese Lösung unter Kühlung eine wässerige Lösung der genau äquivalenten Menge Natriumnitrit. Hierbei entsteht zunächst in der Lösung freie salpetrige Säure, die sofort in statu nascendi verbraucht wird.

Außerdem existieren noch verschiedene Reaktionen, bei denen Diazoniumsalze entstehen, die aber alle nur theoretisches Interesse besitzen. So entstehen Diazoniumsalze, wenn man die Nitrate primärer aromatischer Amine mit Zinkstaub und Salzsäure reduziert,

$$C_6H_5NH_2{,}NO_3H + Zn + 3HCl = C_6H_5.N_2.Cl + ZnCl_2 + 3\,H_2O$$

oder wenn man Phenylhydrazinsalze mit Quecksilberoxyd oxydiert.

$$C_6H_5.NH.NH_2HCl + 2O = C_6H_5.N_2.Cl + 2H_2O.$$

Aus Nitrosobenzolen entstehen Diazoverbindungen mit Hydroxylamin (I) oder mit Stickoxyd (II).

$$\text{I. } C_6H_5.NO + H_2NOH = C_6H_5.N_2.OH + H_2O.$$

$$\text{II. } C_6H_5.NO + 2\,NO = C_6H_5.N_2.NO_3.$$

Alkalidiazotate erhält man auch bei der Verseifung von Nitrosoacetanilid mit Alkalilauge.

$$C_6H_5.N\begin{matrix}NO\\CO.CH_3\end{matrix} + 2\ KOH = C_6H_5.N_2.OK + CH_3.COOK + H_2O.$$

Das Kaliumbenzol-syn-diazotat kann man in Form von weißen perlmutterglänzenden Blättchen erhalten, wenn man eine Benzoldiazoniumchloridlösung in viel, sehr konzentrierte Kalilauge einträgt. Es verpufft nur schwach, aber das entsprechende Silbersalz ist sehr explosiv. Beim Eintragen der Diazoniumsalzlösung in eine Lösung von Kaliumsulfit und überschüssiger Pottasche erhält man die ebenfalls explosiven Salze der Benzoldiazosulfosäure $C_6H_5.N{=}N.SO_3H$, welche dadurch von Interesse sind, daß man hier sowohl das labile Syn-Salz als auch das stabile Anti-Salz in fester Form isolieren kann.

Eigenschaften der Diazoniumsalze. Die Diazoniumsalze sind meist kristallinische farblose Verbindungen, die in Wasser leicht löslich sind und in dieser Lösung in ihrem physikalischen Verhalten den Ammoniumsalzen ähneln. In Alkohol sind sie wenig, in Aether kaum löslich. Sie sind sehr unbeständig und zersetzen sich durch Schlag oder Stoß und beim Erhitzen unter äußerst heftiger Explosion.

Umsetzungen der Diazoniumverbindungen. Wie schon erwähnt, sind die Diazoniumsalze außerordentlich reaktionsfähig und daher sehr wichtige Zwischenprodukte für die Darstellung zahlreicher organischer Präparate. Diese Reaktionen zerfallen in zwei große Gruppen, je nachdem in ihrem Verlauf der Diazostickstoff abgespaltet wird oder die aus zwei Stickstoffatomen bestehende Gruppe erhalten bleibt. Bei allen diesen Reaktionen muß man, wie vorher ausgeführt wurde (S. 752ff.), zunächst eine Umlagerung in Syn-Diazoverbindungen annehmen. Da sowohl diese, als auch die Diazoniumsalze sehr unbeständig sind, muß man stets frisch hergestellte Diazoniumsalzlösungen verwenden.

A. Umsetzungen unter Abspaltung von Stickstoff. Der Verlauf dieser Reaktionen ist vorher geschildert worden. Sie beruhen alle darauf daß die Diazoniumchloride $Ar{-}N\begin{smallmatrix}\nearrow\!\!\!\nearrow N \\ \searrow Cl\end{smallmatrix}$ (vgl. S. 746 Fußnote) oder auch die Diazoniumsalze anderer Säuren bei Gegenwart der verschiedensten Verbindungen H.X oder Me[1]).X zunächst Syn-Diazoverbindungen Ar.N:N.X bilden (s. S. 753),

$$\begin{array}{lll} Ar & & X \\ | & & | \\ N - N + & & \\ | & & | \\ Cl & & Me \end{array} = \begin{array}{ll} Ar & X \\ | & | \\ N = & N + MeCl \end{array}$$

und daß diese sich dann unter Entwickelung von Stickstoff und Vereinigung der Gruppen Ar und X zersetzen.

[1]) Me = Metall.

$$\begin{array}{ll} Ar & X \\ | & | \\ N = & N \end{array} = Ar.X + N_2$$

Im ganzen findet also ein Ersatz der Diazogruppe durch den Rest X statt. Diese Reaktion läßt sich nun außerordentlich variieren und dient zur Darstellung von Phenolen (X = OH), Kohlenwasserstoffen (X = H), Phenoläthern (X = OAlk), Halogenbenzolen (X = Halogen) und Nitrilen (X = CN). Weniger wichtig sind analoge Umsetzungen, die zu Thiophenolen und Thiophenoläthern, Nitroverbindungen, Sulfinsäuren, Rhodanverbindungen, Isocyanaten und Diphenylverbindungen führen. In einzelnen Fällen kann man auch die Diazogruppe durch Aminreste ersetzen.

Phenole erhält man, wenn man die Diazoniumsalze und zwar am besten die Sulfate mit Wasser kocht oder auch nur längere Zeit bei gewöhnlicher Temperatur stehen läßt. Man diazotiert also das Amin in schwefelsaurer Lösung und bläst nach mehrstündigem Stehen Wasserdampf ein, mit dem das entstandene Phenol gewöhnlich überdestilliert. Aus o-Toluidin erhält man so z. B. o-Kresol

$$CH_3.C_6H_4.NH_2 \longrightarrow CH_3.C_6H_4.OH.$$

Kohlenwasserstoffe erhält man aus den Diazoniumsalzen durch Behandeln mit Reduktionsmitteln d. h. Wasserstoff in statu nascendi. Gewöhnlich verfährt man so, daß man die Diazoniumchloridlösung entweder mit Zinnchlorürlösung kocht oder nach Zusatz von überschüssigem Alkali sofort mit Zinnoxydulnatronlösung behandelt. Die Anti-Diazotate werden durch Zinnoxydulnatrium nicht mehr reduziert. Als Nebenprodukte entstehen zuweilen Diphenylderivate (vgl. S. 756). Wahrscheinlich entsteht bei diesen Reduktionen als Zwischenprodukt Phenylhydrazin (s. S. 756), das durch überschüssige Diazoverbindung oxydiert wird. Man kann diese beiden Phasen der Reaktion auch trennen, indem man erst Phenylhydrazin darstellt und dieses mit Kupfersulfat oder Eisenchlorid oxydiert

$$C_6H_5.NH.NH_2 + O = C_6H_6 + N_2 + H_2O.$$

Der Ersatz der Diazogruppe und damit auch der Amino- und Nitrogruppe durch Wasserstoff ist häufig für Konstitutionsbestimmungen wichtig geworden.

Kohlenwasserstoffe und Phenoläther entstehen häufig nebeneinander, wenn man Diazoniumsalze mit Alkoholen erwärmt. Vermutlich verläuft diese Reaktion im Sinne folgender Gleichungen.

$$\begin{array}{lll} C_6H_5 & & H \\ | & & | \\ N - N + & & \\ | & & | \\ Cl & & OC_2H_5 \end{array} = \left[\begin{array}{ll} C_6H_5 & H \\ | & | \\ N = & N \\ +\,ClOC_2H_5 & \end{array}\right] = \begin{array}{l} C_6H_5 - H \\ +\,N_2 \\ +\,HCl + C_2H_4O^{1)} \end{array}$$

$$\begin{array}{lll} C_6H_5 & & OC_2H_5 \\ | & & | \\ N = N + & & \\ | & & | \\ Cl & & H \end{array} = \left[\begin{array}{ll} C_6H_5 & OC_2H_5 \\ | & | \\ N = & N \\ +\,HCl & \end{array}\right] = \begin{array}{l} C_6H_5 - OC_2H_5 \\ +\,N_2 \\ +\,HCl \end{array}$$

[1]) Aldehyd,

Diazoniumsalze mit negativen Substituenten im Kern liefern vorwiegend Kohlenwasserstoffe, mehrwertige Alkohole anscheinend nur Phenoläther.

Zur Ausführung dieser Reaktion läßt sich die gewöhnliche wässerige Diazoniumsalzlösung nicht verwenden. Man kann das feste Diazoniumsalz mit Alkohol erwärmen; häufiger aber leitet man entweder gasförmige salpetrige Säure in die Lösung des Amins im Alkohol oder man erhitzt das Amin mit Alkohol und Aethylnitrit, führt also Diazotierung und Zersetzung in einer Operation aus.

Halogenbenzole entstehen, wenn man die wässerige Diazoniumsalzlösung mit überschüssiger Halogenwasserstoffsäure erhitzt (vgl. S. 753). In dieser einfachsten Form verläuft aber die Reaktion nur bei der Jodwasserstoffsäure glatt. Hier genügt es, die Diazoniumsalzlösung in eine erwärmte Jodkaliumlösung einzutragen. Bei den übrigen Halogenwasserstoffsäuren entstehen als störende Nebenprodukte reichliche Mengen von Phenolen, indem sich offenbar das als Lösungsmittel vorhandene Wasser im Sinne der vorher besprochenen Phenolbildung an der Reaktion beteiligt. Dies läßt sich aber vermeiden, wenn man die Lösung des betreffenden Diazoniumhalogenids mit Kupferchlorür oder Kupferbromür versetzt. Hierbei entstehen additionelle Verbindungen, wie $C_6H_5.N_2.Cl$, Cu_2Cl_2, die sich beim Erwärmen glatt im gewünschten Sinne zersetzen. In dieser wichtigen Form bezeichnet man die Umsetzung nach ihrem Entdecker als „Sandmeyersche Reaktion". Dasselbe erreicht man häufig sehr vorteilhaft dadurch, daß man die Diazoniumsalzlösung mit Kupferpulver versetzt, das offenbar katalytisch wirkt. Unter diesen Bedingungen erfolgt der Zerfall der Diazoniumsalze meist schon in der Kälte, so daß hierdurch die Phenolbildung fortfällt. Fluorverbindungen erhält man am besten, wenn man starke Fluorwasserstoffsäure auf Diazoaminoverbindungen s. S. 758) einwirken läßt,

$$C_6H_5.N:N.NH.C_6H_5 + 2\,HF = C_6H_5F + N_2 + HF, NH_2.C_6H_5,$$

Bromverbindungen auch sehr gut beim Behandeln der Diazobenzolperbromide (s. weiter unten) mit Alkohol.

$$C_6H_5.N_2Br_3 + CH_3CH_2OH = C_6H_5Br + N_2 + CH_3.CHO + 2\,HBr.$$

Nitrile entstehen am besten nach der Sandmeyerschen Reaktion, indem man zu einer Kaliumkupfercyanürlösung (aus Kupfervitriol und Cyankalium) eine frisch bereitete Diazoniumchloridlösung zufügt (vgl. S. 753). Diese Reaktion ist für die Synthese aromatischer Säuren wichtig. In gleicher Weise kann man die Diazogruppe durch den Rhodanrest ersetzen.

Von den minder wichtigen analogen Umsetzungen sei hier nur noch die Bildung von Diphenylverbindungen erwähnt, die am besten (vgl. S. 755) bei Gegenwart von Aluminiumchlorid verläuft.

$$C_6H_5.N_2.Cl + C_6H_6 = C_6H_5\,.\,C_6H_5 + N_2 + HCl.$$

In gleicher Weise kann man auch die Phenylgruppe in heterozyklische Verbindungen einführen.

Bei der Behandlung mit ammoniakalischer Kupferoxydullösung gehen Diazoniumsalze meist in Azobenzole (s. S. 762) über.

$$2C_6H_5.N_2.Cl + Cu_2O = C_6H_5.N:N.C_6H_5 + N_2 + CuCl_2 + CuO.$$

Zuweilen entstehen auch hier Diphenylderivate.

B. Umsetzungen ohne Stickstoffabspaltung. Trotz der Zersetzlichkeit der Diazoverbindungen kann man bei genügender Vorsicht eine ganze Reihe von Reaktionen mit denselben ausführen, bei denen die aus zwei Stickstoffatomen bestehende Gruppe dem Molekül erhalten bleibt und die zum Teil von hervorragender technischer Bedeutung sind. Einige dieser Reaktionen beruhen darauf, daß die Syn-Diazoverbindungen, deren intermediäre Bildung man auch hier zweckmäßig annimmt (vgl. S. 753), vermöge der zwischen den beiden Stickstoffatomen vorhandenen Doppelbindung Elemente oder Verbindungen addieren. Die wichtigste von diesen Reaktionen ist die Anlagerung von Wasserstoff, die zu Arylhydrazinen führt. Aus Benzoldiazoniumchlorid erhält man auf diese Weise das Chlorhydrat des Phenylhydrazins,

$$C_6H_5.N:N.Cl + 4H = C_6H_5.NH.NH_2,HCl,$$

indem gleichzeitig das chlorierte Stickstoffatom fünfwertig wird.

Zur Ausführung der Reduktion behandelt man entweder die Diazoniumchloridlösung mit Zinnchlorür und Salzsäure oder man führt das Diazoniumsalz erst durch Zusatz von Alkalisulfit in das Natriumsalz der Benzoldiazosulfosäure (s. S. 755) über und reduziert dieses durch überschüssiges Sulfit oder besser mit Zinkstaub und Essigsäure zu benzolhydrazinsulfosaurem Natrium, das beim Kochen mit Salzsäure in Natriumbisulfat und Phenylhydrazin zerfällt.

$$\begin{matrix} C_6H_5 \\ | \\ N\equiv N + \\ \vdots \\ Cl \end{matrix} \quad \begin{matrix} SO_3 - Na \\ | \\ \\ \vdots \\ Na \end{matrix} \longrightarrow \begin{matrix} C_6H_5 & SO_3Na \\ | & | \\ N = & N \end{matrix} \xrightarrow{2H}$$

$$\longrightarrow \begin{matrix} C_6H_5 & SO_3Na \\ | & | \\ NH - & NH \end{matrix} \xrightarrow{H_2O} \begin{matrix} C_6H_5 \\ | \\ NH - NH_2 \end{matrix} + NaHSO_4$$

Alle diese Operationen lassen sich sehr bequem ohne Isolierung der Zwischenprodukte in einer Lösung ausführen.

In ähnlicher Weise addiert die Diazogruppe zwei Atome Halogen. So fällt bei Zusatz einer Lösung von Brom in Bromwasserstoffsäure zu einer Benzoldiazoniumnitratlösung das sogenannte Diazobenzolperbromid $C_6H_5N_2Br_3$ als braunes, schnell kristallinisch erstarrendes Oel aus.

$$C_6H_5 \quad Br \qquad\qquad C_6H_5\ Br$$
$$N{\equiv}N + \Big| \longrightarrow N = N$$
$$NO_3 \quad H$$
$$\xrightarrow{2Br} \begin{matrix} C_6H_5 & Br \\ N & — & N \\ Br & & Br \end{matrix} \text{ oder } \begin{matrix} C_6H_5 \\ N = NBr_3 \end{matrix}$$

Diazobenzolperbromid läßt sich mit Alkohol in Brombenzol (s. S. 756) und mit wässerigem Ammoniak in **Diazobenzolimid** (s. S. 771), ein Derivat der **Stickstoffwasserstoffsäure**, überführen.

Bei der Oxydation in alkalischer Lösung mit Ferricyankalium oder Kaliumpermanganat nimmt sowohl das Syn- als auch das Anti-Benzolkaliumdiazotat ein Atom Sauerstoff auf und liefert das Kaliumsalz der sogenannten **Diazobenzolsäure**

$$C_6H_5.N:N.OK + O = C_6H_5.N:N\begin{matrix}\nearrow O \\ \searrow OK\end{matrix}$$

Diese Diazobenzolsäure gehört zu den tautomeren Substanzen (vgl. im Artikel „**Ammoniakderivate**" S. 278), denn ihr Silbersalz gibt mit Jodmethyl einen Methylester $C_6H_5.N:N\begin{matrix}\nearrow O \\ \searrow OCH_3\end{matrix}$ dessen Konstitution der obigen Formel entspricht, während das Natriumsalz bei gleicher Behandlung eine Methylverbindung — das sogenannte **Phenylmethylnitramin** $C_6H_5.N\begin{matrix}\nearrow CH_3 \\ \searrow NO_2\end{matrix}$ — liefert, in der die Methylgruppe am Stickstoff haftet. Man muß also der Diazobenzolsäure die beiden tautomeren Formeln

$$C_6H_5 — N:N\begin{matrix}\nearrow O \\ \searrow OH\end{matrix} \longleftrightarrow C_6H_5 — NH — N\begin{matrix}\nearrow O \\ \searrow O\end{matrix}$$

zuerteilen und bezeichnet sie daher auch als **Nitranilid** oder **Phenylnitramin**. Beim Erhitzen oder mit Mineralsäuren lagert sich Diazobenzolsäure in o- und p-Nitranilin und das Phenylmethylnitramin in o- und p-Nitromethylanilin um, indem die Nitrogruppe vom Stickstoff an den Benzolkern wandert.

Mit Hydroxylamin (I), Phenylhydrazin (II) oder Hydrazin (III) liefert Benzoldiazoniumsulfat Diazobenzolimid (s. S. 771) und im letzteren Falle daneben auch freie **Stickstoffwasserstoffsäure** (s. S. 770).

Diese Reaktionen erklären sich vielleicht auf folgende Weise.

$$\text{I. } C_6H_5.N:N.SO_4H + NH_2OH$$
$$\longrightarrow [C_6H_5.N:N.NHOH]$$
$$\longrightarrow [C_6H_5.NH.N:N.OH]$$
$$\longrightarrow C_6H_5.N\begin{matrix} N \\ | \\ N \end{matrix} + H_2O$$

$$\text{II. } C_6H_5.N:N.SO_4H + H_2N.NHC_6H_5$$
$$\longrightarrow [C_6H_5.N:N.NH.NHC_6H_5]$$
$$\longrightarrow [C_6H_5.NH.N:N.NHC_6H_5]$$
$$\longrightarrow C_6H_5.N\begin{matrix} N \\ | \\ N \end{matrix} + NH_2.C_6H_5$$

$$\text{III. } C_6H_5.N:N.SO_4H + H_2N.NH_2$$
$$\longrightarrow [C_6H_5.N:N.NH.NH_2]$$
$$\longrightarrow [C_6H_5.NH.N:N.NH_2]$$
$$\longrightarrow \begin{cases} C_6H_5.N\begin{matrix} N \\ | \\ N \end{matrix} + NH_3 \\ C_6H_5NH_2 + \begin{matrix} N \quad N \\ NH \end{matrix} \end{cases}$$

Die bei II und III angenommenen, aber meist nicht isolierbaren primären Zwischenprodukte mit einer Kette von vier Stickstoffatomen sind Derivate des sogenannten Buzylens (s. S. 774).

Viel wichtiger als diese Reaktionen ist die Fähigkeit der Syn-Diazoverbindungen mit Phenolen, Arylaminen und anderen Alkylaminen zu „**kuppeln**" (vgl. S. 751 und 752).

Bringt man Diazoniumsalze (oder die daraus gebildeten Syn-Diazoverbindungen) (vgl. S. 752ff.) in alkalischer, schwach saurer oder neutraler Lösung mit Phenolen oder **tertiären** Arylaminen zusammen, so „kuppeln" sie unter Bildung von **Oxy-** oder **Dialkylamino-Azoverbindungen** (s. S. 762), indem die Diazogruppe in den Benzolkern eingreift.

$$C_6H_5.N:N.OK + C_6H_5.OH$$
$$= C_6H_5.N:N.C_6H_4.OH + KOH$$
Oxyazobenzol.

$$C_6H_5.N:N.Cl + C_6H_5.N(Alk)_2$$
$$= C_6H_5.N:N.C_6H_4.N(Alk)_2 + HCl$$
Dialkylaminoazobenzol.

Der Eingriff in den Benzolkern erfolgt im allgemeinen in der p-Stellung zur Hydroxyl- bezw. Dialkylaminogruppe. Ist diese p-Stellung aber schon durch eine andere Gruppe besetzt, so erfolgt Kuppelung in o-Stellung.

Anders erfolgt die Kuppelung der Diazoverbindungen im allgemeinen mit **primären** oder **sekundären** Alkylaminen. Hier ist der am Stickstoff noch vorhandene Wasserstoff offenbar im allgemeinen reaktionsfähiger als der des Benzolkerns, d. h. die Diazogruppe kettet sich an das Stickstoffatom und es entstehen Körper, welche nach der früher (S. 746) gegebenen Definition nicht Azo-, sondern noch **Diazokörper** sind, die sogenannten **Diazoaminoverbindungen** (s. S. 758).

$$C_6H_5.N:N.Cl + H_2N.C_6H_5$$
$$= C_6H_5.N:N.NH.C_6H_5 + HCl$$

Die aus Diazoverbindungen mit primären aromatischen Aminen erhaltenen Diazoaminoverbindungen lagern sich leicht in **Aminoazoverbindungen** (s. S. 759 und 764) um, indem die Diazogruppe vom Stickstoff in den Benzolkern und zwar in die p-Stellung wandert. Solche Aminoazoverbindungen entstehen auch **direkt** ohne Zwischenbildung von Diazo-

aminoverbindungen aus Diazoniumsalzen mit solchen primären aromatischen Aminen, welche in m-Stellung zur Aminogruppe noch eine zweite Aminogruppe (m-Diamine) oder auch eine andere Gruppe (z. B. m-Toluidin) enthalten.

$$C_6H_5.N:NCl + H\langle X \rangle NH_2$$
$$= C_6H_5.N:N\langle X \rangle NH_2 + HCl$$

Hier ist das in p-Stellung zur Aminogruppe stehende Kernwasserstoffatom offenbar infolge der gleichzeitigen Beeinflussung durch die in o- und in p-Stellung zu ihm stehenden Gruppen reaktionsfähiger geworden als die am Stickstoff stehenden Wasserstoffatome. Die m-Diamine liefern daher, wie schon erwähnt wurde (S. 754), bei der Diazotierung mit unzureichenden Mengen salpetriger Säure direkt Aminoazokörper. Auch die Naphtylamine kuppeln mit Diazoverbindungen gewöhnlich direkt zu Aminoazoverbindungen.

Diazoaminoverbindungen entstehen auch aus Diazoverbindungen mit primären und sekundären aliphatischen Aminen und Aminen vom Typus des Benzylamins.

Läßt man zwei Moleküle Diazoverbindung in alkalisch-alkoholischer Lösung auf Anilin einwirken, so entsteht eine Disdiazoaminoverbindung

$$2C_6H_5.N:NOK + H_2N.C_6H_5 = \begin{matrix} C_6H_5.N:N \\ C_6H_5.N:N \end{matrix} N.C_6H_5 + 2KOH$$

und analog entsteht mit Ammoniak Disdiazobenzolamid $(C_6H_5.N:N\text{-})_2NH$.

Erwähnenswert ist, daß aus Benzoldiazoniumchlorid mit p-Toluidin einerseits und p-Toluoldiazoniumchlorid mit Anilin andererseits die gleiche Diazoaminoverbindung entsteht und zwar allem Anschein nach diejenige, die man aus Benzoldiazoniumchlorid und p-Toluidin zu erwarten hat. Die nach den beiden Reaktionen zu erwartenden Produkte lassen sich als desmotrope oder tautomere Modifikationen auffassen

$$C_6H_5.N:N.NH.C_6H_4.CH_3 \longleftrightarrow$$
Aus Benzoldiazoniumchlorid und Toluidin
$$\longleftrightarrow C_6H_5.NH.N:N.C_6H_4.CH_3$$
Aus Anilin und Toluoldiazoniumchlorid

Die Kuppelung der verschiedensten Diazoniumsalze mit den verschiedensten Phenolen und aromatischen Aminen läßt sich außerordentlich mannigfaltig variieren und hat direkt oder indirekt zu zahllosen Oxy- und Aminoazoverbindungen geführt, die namentlich in der Benzol-, Naphtalin- und Diphenylreihe als Azofarbstoffe von großer Bedeutung für die Technik sind. Noch weiter vergrößert wird die Zahl der möglichen Kombinationsprodukte dadurch, daß man in aromatischen Basen mit mehreren primären Aminogruppen, wie z. B. im Benzidin $NH_2.C_6H_4.C_6H_4.NH_2$ Diazotierung und Kuppelung mehrmals im selben Molekül ausführen kann, was zu Bisdiazoverbindungen und Disazofarbstoffen (s. S. 767) geführt hat. Letztere kann man auch erhalten, wenn man in den Aminoazokörpern die Aminogruppe wiederum diazotiert und von neuem „kuppelt". Analoge Kuppelungen finden zwischen Diazoniumsalzen und heterozyklischen Oxy- und Aminoverbindungen statt.

Uebrigens lassen sich Diazoverbindungen auch mit aliphatischen Komplexen kuppeln, wenn diese ein leicht bewegliches Wasserstoffatom besitzen, wie die Nitroparaffine, β-Ketosäureester, Malonester u. a. Doch haben die entstehenden Kombinationsprodukte, wie man jetzt allgemein annimmt, nicht die zu erwartende Azostruktur, sondern lagern sich im Entstehungsmoment in die tautomere Hydrazonform um (vgl. S. 760).

$$C_6H_5.N:N.Cl + H_2C(COOC_2H_5)_2$$
$$\rightarrow [C_6H_5.N:N.CH(COOC_2H_5)_2]$$
$$\rightarrow C_6H_5.NH.N:C(COOC_2H_5)_2$$

Näheres hierüber findet sich in dem Artikel „Ammoniakderivate" bei den Hydrazonen (S. 306).

2c) Diazoaminoverbindungen. Die Diazoaminoverbindungen, die durch die Gruppe $-N=N-N=$ charakterisiert sind (vgl. S. 746) entstehen, wie schon erwähnt fast immer als erste Produkte, wenn man Diazoniumsalze in neutraler oder essigsaurer Lösung mit primären oder sekundären Aminen „kuppelt". So liefert Benzoldiazoniumchlorid mit Anilin das sogenannte Diazoaminobenzol

$$C_6H_5.N:NCl + H_2N.C_6H_5 =$$
$$C_6H_5.N:N.NHC_6H_5 + HCl.$$

Zur Darstellung des Diazoaminobenzols werden z. B. 10 g Anilin in 100 ccm Wasser und soviel starker Salzsäure, als 12 g HCl entspricht, gelöst und unter Eiskühlung tropfenweise mit einer Lösung von 8 g Natriumnitrit in 50 ccm Wasser versetzt. Dann mischt man unter weiterer Kühlung mit einer eiskalten Lösung von 10 g Anilin in 50 ccm Wasser und soviel starker Salzsäure, als 4 g HCl entspricht und schließlich mit einer konzentrierten Lösung von 50 g kristallisiertem Natriumacetat. Das Diazoaminobenzol scheidert sich nach kurzem Stehen kristallinisch ab.

Als Ausnahme ist schon erwähnt worden, daß m-substituierte Amine und Naphtylamine mit Diazoniumsalzen Aminoazokörper liefern.

In gleicher Weise entstehen Diazoamino-

verbindungen direkt aus primären aromatischen Aminen mit salpetriger Säure, wenn von dem Amin zwei Moleküle für jedes Molekül salpetrige Säure vorhanden sind. Offenbar entsteht hier primär ein Diazoniumsalz, das sofort mit dem Ueberschuß des Amins kuppelt.

Nach dieser Methode erhält man z. B. Diazoaminobenzol, wenn man zu einer Lösung von 15 g salzsaurem Anilin in 300 ccm Wasser unter Kühlung eine Lösung von 5,2 g Natriumnitrit und 10 g kristallisiertem Natriumacetat zutropft.

Ein analoger Vorgang findet statt, wenn man o-Diamine und andere Diamine, deren Aminogruppen benachbart zueinander stehen, diazotiert. Hier entstehen ringförmige Diazoaminoverbindungen, die sogenannten Azimide (s. S. 754)

$C_6H_4(NH_2)_2 \rightarrow [C_6H_4(NH_2)(N{:}NCl)] \rightarrow C_6H_4{<}^{NH}_{N=N}$ (NH, N, N)

Auch Nitrosoanilide bilden mit primären Aminen unter Abspaltung des Säurerestes Diazoaminoverbindungen

$$C_6H_5.N(CO.CH_3).NO + H_2N.C_6H_5 =$$
Nitrosoacetanilid Anilin
$$C_6H_5.NH.N{:}N.C_6H_5 + CH_3.COOH$$
Diazoaminobenzol

Schließlich entstehen Diazoaminoverbindungen noch aus den sogenannten Diazoimiden mit Alkylmagnesiumhalogeniden (vgl. S. 772).

Daß Diazoniumsalze unter bestimmten Bedingungen mit primären Aminen (und Ammoniak) auch Disdiazoaminoverbindungen geben können, ist schon (S. 758) erwähnt worden. Eine größere Bedeutung besitzen diese Verbindungen nicht.

Die rein aromatischen Diazoaminokörper sind kristallinische, meist intensiv gelb gefärbte, in Wasser, verdünnten Säuren und Alkalien unlösliche Verbindungen, zeigen aber sowohl schwach basische als auch schwach saure Eigenschaften, indem sie einerseits unbeständige Salze mit Platinchlorwasserstoffsäure und andererseits Natrium- und Silbersalze liefern, in denen das am Stickstoff stehende Wasserstoffatom durch Metall ersetzt ist. Die Diazoaminoverbindungen sind wesentlich beständiger als die Diazonium- und Diazosalze. Sie schmelzen meist ohne Zersetzung und verpuffen erst bei höherer Temperatur. Mit kalter Salzsäure zerfallen sie oft wieder in Diazoniumchlorid und Aminhydrochlorid, während sie beim Erhitzen mit verdünnten Säuren natürlich Phenole (s. S. 755) und Aminsalz liefern. Durch salpetrige Säure werden sie vollständig in Diazoniumsalze übergeführt.

Die wichtigste Eigenschaft der aromatischen Diazoaminoverbindungen ist ihre schon erwähnte (S. 757) Umwandelbarkeit in Aminoazokörper (s. S. 763), die man als eine Wanderung der Diazogruppe vom Stickstoff in den Kern deuten kann und die damit ein Analogon vieler ähnlicher Umsetzungen (vgl. den Artikel „Ammoniakderivate“ S. 274) bildet. Wie in ähnlichen Fällen (vgl. S. 757) wandert die Diazogruppe gewöhnlich in die p-Stellung zur Aminogruppe, ist diese aber besetzt, in die o-Stellung. Die Umlagerung bildet die wichtigste Darstellungsmethode für primäre Aminoazokörper. Gewöhnlich wird zu dem genannten Zweck der Diazoaminokörper mit dem betreffenden freien Amin und dessen Chlorhydrat gelinde erwärmt (s. S. 764), doch wirken diese Zusätze nur katalytisch und die Reaktion ist monomolekular.

$$C_6H_5.N{:}N.NH.C_6H_5$$
Diazoaminobenzol
$$\longrightarrow C_6H_5.N{:}N.C_6H_4.NH_2$$
p-Aminoazobenzol.

Setzt man ein anderes Amin zu, als in dem Molekül der Diazoaminoverbindung schon gebunden ist, so tritt zuweilen Austausch ein, der aber primär eine neue Diazoaminoverbindung liefert, die sich erst sekundär in die Aminoazoverbindung umlagert. Beim gelinden Erwärmen mit Phenolen liefern die Diazoaminokörper Oxyazoverbindungen.

$$C_6H_5.N{:}N.NH.C_6H_5 + H.C_6H_4.OH$$
$$= C_6H_5.N{:}N.C_6H_4.OH + C_6H_5NH_2$$

Besonders beständig und wenig reaktionsfähig sind die als Azimide bezeichneten ringförmigen Diazoaminoverbindungen (s. oben und S. 754).

Das am Stickstoffatom stehende Wasserstoffatom der Diazoniumverbindungen läßt sich wie in den gewöhnlichen sekundären Aminen durch Alkylgruppen und Säurereste ersetzen und reagiert auch mit Phenylisocyanat unter Bildung von Harnstoffderivaten (vgl. Artikel „Ammoniakderivate“ S. 274 und 279). Die Diazoaminoverbindungen mit zwei verschiedenen aromatischen Resten gehören, wie schon (S. 758) gesagt worden ist, zu den tautomeren oder desmotropen Verbindungen.

Die aus Diazoniumsalzen mit primären

oder sekundären aliphatischen Aminen entstehenden gemischten Diazoaminoverbindungen sind wenig wichtig.

Das aus Methylazid (s. S. 771) mit Methylmagnesiumjodid entstehende rein aliphatische Diazoaminomethan $CH_3.N:N.NH.CH_3$ ist eine unbeständige sehr explosive Verbindung.

3. **Azoverbindungen.** Nach der eingangs (S. 746) gegebenen Definition bezeichnet man als eigentliche Azokörper nur diejenigen Verbindungen, welche die sogenannte Azogruppe —N = N— beiderseitig an Kohlenwasserstoffreste gebunden enthalten.

3 a) Aliphatische Azokörper, welche die —N = N — an zwei aliphatische Reste gebunden enthalten, sind wenig wichtige Verbindungen, von denen bisher kaum einige Repräsentanten bekannt sind. Sie entstehen aus den Dialphylhydrazinen durch Oxydation. So liefern die Hydrazofettsäureester, -amide und -nitrile mit Bromwasser oder Chromsäure die entsprechenden Derivate von Azofettsäuren.

$$\begin{matrix} NH.CH_2.COOR \\ | \\ NH.CH_2.COOR \end{matrix} + O = \begin{matrix} N.CH_2.COOR \\ \| \\ N.CH_2.COOR \end{matrix} + H_2O$$

Die einfachste Azofettsäure, die Azoameisensäure oder Azodicarbonsäure $HOOC.N:N.COOH$ ist als zersetzliches und beim Erhitzen verpuffendes Kaliumsalz aus dem Azodicarbonamid mit Kalilauge erhalten worden

Ihr Diamidin

$$\begin{matrix} NH_2 & & NH_2 \\ & C.N:N.C & \\ NH \!\!\!\!/\!\!/ & & \backslash\!\!\backslash NH \end{matrix}$$

entsteht als Nitrat bei der Oxydation von Aminoguanidinnitrat mit Kaliumpermanganat. Aehnlich hat Thiele durch Oxydation von symmetrischem Dimethylhydrazin mit Chromsäure Azomethan $CH_3.N:N.CH_3$ als ein beim Erhitzen heftig explodierendes Gas erhalten.

3b) Gemischte, fettaromatische Azokörper, in denen also die Azogruppe einerseits an einen aliphatischen, andererseits aber an einen aromatischen Rest gebunden ist, entstehen ebenfalls durch Oxydation entsprechender symmetrischer Dialkylhydrazine, die sich gewöhnlich in ätherischer Lösung mit Quecksilberoxyd ausführen läßt. So liefert das symmetrische Aethylphenylhydrazin bei der Oxydation Aethan-azo-benzol.

$$C_6H_5.NH.NH.CH_2.CH_3 + O$$
$$= C_6H_5.N:N.CH_2.CH_3 + H_2O.$$

Diese Azokörper sind gelb bis gelbrot gefärbte, ziemlich beständige Oele, die sich bei vermindertem Druck unzersetzt destillieren lassen. Sie sind isomer mit den entsprechenden Aldehydphenylhydrazonen — so das Aethan-azo-benzol mit dem Acetaldehydphenylhydrazon —.

$$\underset{\text{Aethanazobenzol}}{CH_3.CH_2.N:N.C_6H_5} \leftrightarrow \underset{\text{Acetaldehydphenylhydrazon}}{CH_3.CH:N.NH.C_6H_5}$$

in die sie sich teilweise durch kalte starke Mineralsäuren umlagern lassen. Beide Verbindungen unterscheiden sich nur durch die Stellung eines Wasserstoffatoms und den dadurch bedingten Bindungswechsel voneinander, sind aber durchaus verschieden und jede für sich beständig.

Befinden sich aber in dem aliphatischen Rest der Azoverbindung an dem mit der Azogruppe direkt verbundenen Kohlenstoff Gruppen, welche die an demselben Kohlenstoffatom stehenden Wasserstoffatome leicht beweglich machen — z. B. eine Nitrogruppe oder zwei Carbonyl- oder Carboxylgruppen usw. — so wird aus der Isomerie Tautomerie, d. h. die eine der beiden Formen — Azokörper oder Phenylhydrazon — wird so labil, daß sie nicht mehr in freiem Zustande zu existieren vermag, sondern sich im Entstehungsmoment sofort in die andere Form umlagert. Man erhält also immer nur die eine Form, auch wenn man eine Darstellungsmethode anwendet, nach der man die andere Form erwarten sollte. Die Frage, ob die einzig existierende Form die eine oder die andere Konstitution besitzt, ist für den vorliegenden Fall — soweit man nicht tautomere Verbindungen immer als Gleichgewichtsgemische beider möglichen Formen ansieht — durch neuere Arbeiten dahin entschieden, daß den freien Verbindungen die Phenylhydrazonstruktur zukommt. Solche, nach dem eben Gesagten nicht existenzfähigen Azokörper entstehen nun bei der schon (S. 758) erwähnten Kuppelung von Diazoverbindungen mit primären Nitroparaffinen, β-Ketosäureestern, Malonsäureester, β-Diketonen, β-Ketoaldehyden usw. Alle die so entstehenden Verbindungen sind also nach der jetzt allgemein herrschenden Auffassung keine Azokörper, sondern Phenylhydrazone und sind daher schon in dem Artikel „Ammoniakderivate" (S. 306) bei dieser Körperklasse behandelt werden. Zugunsten der erwähnten Auffassung spricht namentlich folgendes. Bei der Kuppelung von Benzoldiazoniumchlorid mit Methylacetessigester sollte man eine Azoverbindung erwarten, welche die genannte Tautomerie nicht mehr zeigen könnte, weil das an der Azogruppe stehende aliphatische Kohlenstoffatom hier keinen leicht beweglichen Wasserstoff mehr gebunden hat. Trotzdem ist auch hier die Tendenz zur Hydrazonbildung so groß, daß der zu erwartende Benzolazomethylacetessigester im Entstehungsmoment unter Abspaltung der ebenfalls nur lose gebundenen Acetylgruppe in das Phenyl-

hydrazon des Brenztraubensäureesters übergeht.

$$C_6H_5.N:N.OH + HC(CH_3)\begin{matrix}COOC_2H_5\\CO.CH_3\end{matrix}$$

$$= \left|C_6H_5.N:N.C(CH_3)\begin{matrix}CO.CH_3\\COOC_2H_5\end{matrix} + H_2O\right|$$

$$= C_6H_5.NH.N:C(CH_3).COOC_2H_5 + CH_3.COOH.$$

Es sei übrigens erwähnt, daß man, trotz der jetzt allgemein angenommenen Auffassung der fraglichen Verbindungen als von Hydrazonen dieselben häufig aus Bequemlichkeit entsprechend ihrer Bildungsweise als Azokörper benennt, so das Monophenylhydrazon des Diketobuttersäureesters als Benzolazoacetessigester usw.

Ein zyklischer fettaromatischer Azokörper ist das Cinnolin

[Strukturformel: Benzolring mit CH—CH—N=N (Cinnolin)]

das bei den „heterozyklischen Verbindungen" abgehandelt wird. Das wichtigste Derivat desselben, die Oxycinnolincarbonsäure entsteht aus Phenylpropiolsäure-o-diazoniumchlorid beim Erwärmen mit Wasser,

[Strukturformel: Benzolring mit C≡C—COOH und N=N.OH → Benzolring mit C(OH)=C.COOH, N=N]

und geht durch Kohlensäureabspaltung in Oxycinnolin über, aus dem sich das Cinnolin selbst gewinnen läßt.

Zu den fettaromatischen Azokörpern kann man auch die sogenannten Formazylverbindungen vom Typus

$$X.C\begin{matrix}N:N.Ar\\N.NH.Ar\end{matrix}$$

rechnen, die gleichzeitig Azokörper und Phenylhydrazone sind. Sie entstehen hauptsächlich bei der Einwirkung von Diazoniumsalzen auf solche Hydrazone, welche an dem mit dem Hydrazonrest verbundenen Kohlenstoffatom noch Wasserstoff oder leicht abspaltbare Gruppen, wie Carboxyl oder Acetyl enthalten. Da nun solche Phenylhydrazone, wie eben ausgeführt wurde, bei der Einwirkung von Diazoniumsalzen auf aliphatische Carbonyl- und Carboxylverbindungen entstehen, führt diese Reaktion bei Anwendung überschüssigen Diazoniumsalzes gewöhnlich weiter zu Formazylverbindungen. Bei der Einwirkung von überschüssigem Benzoldiazoniumchlorid auf Acetessigester entsteht also erst der sogenannte Benzolazoacetessigester (Diketobuttersäureestermonophenylhydrazon), dann unter Abspaltung der Acetylgruppe Formazylcarbonsäureester und schließlich sogar unter Abspaltung der Carboxylgruppe Formazylazobenzol.

$$3C_6H_5.N:NOH + H_2C\begin{matrix}CO.CH_3\\COOC_2H_5\end{matrix} \rightarrow$$

$$C_6H_5.NH.N:C\begin{matrix}CO.CH_3\\COOC_2H_5\end{matrix} \rightarrow$$

$$\begin{matrix}C_6H_5.N:N\\C_6H_5.NH.N\end{matrix}C—COOC_2H_5 \rightarrow$$

$$\begin{matrix}C_6H_5.N:N\\C_6H_5.NH.N\end{matrix}C—N:N.C_6H_5$$

Die Formazylverbindungen sind dunkelrot gefärbt und kristallisieren gut. Bei der Reduktion mit Zinkstaub und Schwefelsäure zerfallen sie in ein Hydrazin und ein Säurehydrazid, während sie bei der Oxydation farblose heterozyklische Basen, die sogenannten Tetrazoliumhydroxyde vom Typus

$$X.C\begin{matrix}N.N.Ar\\ \quad OH\\N:N\\ \quad Ar\end{matrix}$$

liefern. Mit starken Mineralsäuren liefern die Formazylverbindungen unter Abspaltung von Arylamin Phen-α-triazine, ebenfalls heterozyklische Verbindungen.

[Strukturformel: Benzolring (H) mit N=N—C—X, N—NH.Ar = Benzolring mit N=N, C—X, N + H_2NAr]

3c) Aromatische Azokörper enthalten die Azogruppe —N=N— beiderseitig direkt an aromatische Kerne gebunden. Sie können als symmetrische und unsymmetrische Azoverbindungen unterschieden werden, je nachdem die beiden an der Azogruppe stehenden Reste gleich oder verschieden sind. Erstere bezeichnet man, indem man auf das Vorwort Azo den Namen der beiden gleichen Kerne nur einmal folgen läßt: z. B. Azobenzol, Azo-p-toluol usw. Bei den unsymmetrischen muß man beide Kerne benennen, indem man das Wort Azo zwischen deren Namen setzt: z. B. Benzolazo-p-toluol oder indem man sie als Substitutionsderivate das Azobenzols bezeichnet und die Stellung der Substituenten in beiden Kernen mit den Zahlen 1 bis 6 und 1' bis 6'

kenntlich macht, z. B. 4 Methyl-4'-Amino-Azobenzol.

Darstellung der Azoverbindungen. Die wichtigste Methode zur Gewinnung von einfachen und substituierten Azokörpern mit Ausnahme der später gesondert zu behandelnden Amino- und Oxyazokörper (s. unten) ist die Reduktion aromatischer Nitroverbindungen, bei der als Zwischenprodukte die Azoxyverbindungen (s. S. 768) entstehen.

$$\begin{matrix} Ar.NO_2 \\ Ar.NO_2 \end{matrix} \rightarrow \begin{matrix} Ar.N \\ | \\ Ar.N \end{matrix} \!\!> O \rightarrow \begin{matrix} Ar.N \\ \| \\ Ar.N \end{matrix}$$

Die Reduktion muß in alkalischer Lösung ausgeführt werden, da sie in saurer Lösung erfahrungsgemäß meist weiter geht und nur Amine liefert. Als Reduktionsmittel sind zur Erzeugung von Azokörpern Zinkstaub mit Ammoniak, Natronlauge oder alkoholischer Kalilauge, Zinnoxydulnatronlösung (Zinnchlorür und Natronlauge) und Natriumamalgam und Alkohol geeignet. Auch elektrolytisch läßt sich die Reduktion gut erreichen.

Auch die als Zwischenprodukt genannten Azoxykörper lassen sich durch Eisenfeilspäne unter Ausschluß von Wasser zu Azokörpern reduzieren.

Ohne praktische Bedeutung aber theoretisch wichtig ist es, daß Azokörper durch Oxydation symmetrischer Hydrazine (der sogenannten Hydrazokörper) oder primärer aromatischer Amine und Kaliumpermanganat oder Ferricyankalium in alkalischer Lösung,

$$Ar.NH.NH.Ar + O = Ar.N:N.Ar + H_2O$$
$$Ar.NH_2 + H_2N.Ar + O_2 = Ar.N:N.Ar + 2H_2O$$

sowie bei der Einwirkung von Nitrosobenzolen auf primäre aromatische Amine

$$Ar.N:O + H_2N.Ar = Ar.N:N.Ar + H_2O$$

entstehen. Daß Azoverbindungen auch aus Diazoniumsalzen mit ammoniakalischer Kupferoxydullösung entstehen, ist schon (S. 756) gesagt worden. Natürlich kann man sie auch aus Aminoazokörpern erhalten, wenn man deren Aminogruppe durch Diazotierung und Reduktion (vgl. S. 755) eliminiert.

Letztere Reaktion, sowie die komplizierter verlaufende Bildung von Azokörpern beim Erhitzen eines Gemisches von einer Nitroverbindung mit einem primären Amin unter Zusatz von pulverisiertem Aetzkali oder Aetznatron führt auch zu unsymmetrischen Azokörpern.

Eigenschaften. Die Azoverbindungen sind sehr beständige, ohne Zersetzung destillierbare, zum Teil sehr gut kristallisierende, indifferente Verbindungen. Sie sind orangegelb bis intensiv rot gefärbt. Man bezeichnet daher die Azogruppe als eine „chromophore Gruppe". Die Azokörper sind die Stammsubstanzen der außerordentlich wichtigen Azofarbstoffe (vgl. den Artikel „Farbstoffe"). Sie selbst sind — als indifferente Verbindungen — noch keine Farbstoffe. Sie werden aber zu Farbstoffen, wenn in ihr Molekül noch eine sogenannte „auxochrome Gruppe" (Hydroxyl-, Amino-, Carboxyl- oder Sulfosäuregruppe) als Kernsubstituent eintritt. Die Azoverbindungen sind so beständig, daß man sie direkt chlorieren, nitrieren oder sulfurieren kann. Nur gegen Reduktionsmittel sind sie einigermaßen empfindlich und werden entweder zu symmetrischen Hydrazinen (Hydrazoverbindungen) oder unter Spaltung zu zwei Molekülen Amin reduziert

$$\begin{matrix} Ar - N \\ \| \\ Ar - N \end{matrix} \longrightarrow \begin{matrix} Ar.NH \\ | \\ Ar.NH \end{matrix} \longrightarrow \begin{matrix} ArNH_2 \\ \\ ArNH_2 \end{matrix}$$

Letzteres ist für die Bestimmung ihrer Konstitution wichtig.

Durch Oxydation lassen sich Azoverbindungen wieder in Azoxyverbindungen überführen (s. oben).

Eine zyklische Azoverbindung ist das bei den „heterozyklischen Verbindungen" ausführlicher zu besprechende Phenazon

N = N

das in normaler Weise aus o,o-Dinitrodiphenyl mit Natriumamalgam und Methylalkohol oder durch elektrolytische Reduktion entsteht (s. den Artikel „Azine").

3d) Oxyazokörper und Aminoazokörper. Wie schon erwähnt, sind die Oxy- und Aminoazoverbindungen, d. h. Azokörper, in deren aromatischen Kernen eine oder mehrere Hydroxyl- bezw. Aminogruppen als Substituenten stehen, die einfachsten Repräsentanten der wichtigen Azofarbstoffe, die zum Färben von Wolle und Seide direkt verwendbar sind. Noch wichtiger als diese einfachsten Azofarbstoffe sind deren Sulfosäuren und namentlich diejenigen Analoga, welche als aromatische Kerne den Naphtalinkern oder den Komplex des Diphenyls enthalten, sind praktisch von großer Bedeutung. Aber nicht nur als Farbstoffe sondern auch als Zwischenprodukte für die Gewinnung anderer Farbstoffe, der Disazokörper sowie der Induline und Eurhodine sind z. B. die Aminoazoverbindungen technisch wertvoll (vgl. S. 765). So ist es natürlich, daß die Zahl der mit der Zeit bekannt gewordenen Oxy- und Aminoazokörper eine ungeheuer große ist, da man planmäßig durch immer neue Kombinationen neue Farbstoffe der verschiedensten Nuancen und von möglichst großer Echtheit zu erhalten versucht hat.

Darstellung der Oxy- und Aminoazokörper. Alle die zahllosen bekannten Azofarbstoffe sind im wesentlichen nach einer Methode hergestellt worden, nämlich durch die schon erwähnte (S. 757) „Kuppelung“ von Diazoniumsalzen mit Phenolen und aromatischen Aminen oder deren Sulfosäuren, oder von diazotierten Aminosulfosäuren oder von Diazoniumsalzen anders substituierter Amine mit Sulfosäuren oder wiederum mit anderen kernsubstituierten Phenolen oder Aminen. In ganz analoger Weise kann man Diazoniumsalze auch mit Derivaten heterozyklischer Kerne kuppeln, ebenso wie sich Aminoderivate heterozyklischer Kerne diazotieren und dann zu Azokörpern kuppeln lassen, doch besitzen die so gewonnenen Azofarbstoffe meist keine größere praktische Bedeutung. Es ist an der genannten Stelle schon ausgeführt worden, daß die Kuppelung von Diazoniumsalzen mit Phenolen oder tertiären aromatischen Aminen direkt zu Oxy- oder Aminoverbindungen führt, während mit primären oder sekundären Aminen im allgemeinen (vgl. S. 757) zuerst Diazoaminoverbindungen entstehen, welche aber leicht (s. S. 759 und 764) in Aminoazokörper umgelagert werden können. Es ist auch schon gesagt worden, daß bei diesen Reaktionen die Azogruppe wenn möglich in die p-Stellung zur Hydroxyl- oder Aminogruppe tritt. Dementsprechend sind die wichtigen Azofarbstoffe meistenteils p-Oxy- oder p-Aminoazokörper. Ist die p-Stellung aber schon durch irgendeine andere Gruppe besetzt, so tritt Kuppelung in o-Stellung ein. Sind aber p-Stellung und beide o-Stellungen besetzt, so ist das betreffende Phenol oder Amin nicht mehr zur Kuppelung verwendbar.

Etwas verwickelter liegen die Verhältnisse bei der Kuppelung von Diazoniumsalzen mit Naphtolen und Naphtylaminen, die zu den namentlich in Form ihrer Sulfosäuren wichtigen Naphtalinazofarbstoffen führt. Auch hier greift die Kuppelung bei freier p-Stellung in diese,

NH_2 → NH_2, $N:N.C_6H_5$

bei besetzter p-Stellung aber in o-Stellung ein. Bei der Kuppelung mit β-Naphtolen und β-Naphtylaminen ist aber dazu zu erwähnen, daß hier Kuppelung in der o-ständigen α-Stellung, nicht in der ja ebenfalls o-ständigen β-Stellung stattfindet

OH → $N:N.C_6H_5$, OH

Nur beim β-Oxy-α-naphtochinon findet infolge der chinoiden Struktur des Kernes entgegen der eben angeführten Regel Kuppelung in der einzig noch freien β-Stellung statt.

O, O, —OH → O, O, —OH, —$N:NC_6H_5$

Aber auch die erste Regel, daß bei freier p-Stellung Kuppelung in dieser eintritt, erleidet eine Ausnahme, wenn in o- oder peri-Stellung zu dieser freien p-Stelle eine Sulfosäuregruppe steht. In diesem Falle tritt trotz freier p-Stellung o-Kuppelung ein.

OH, SO_3H → OH, $N:N.C_6H_5$, SO_3H

OH, SO_3H → OH, $N:N.C_6H_5$, SO_3H

Wenn o- und p-Stellung frei sind, findet zuweilen Kuppelung in beiden statt, d. h. es entstehen beide möglichen Kuppelungsprodukte oder auch Disazoverbindungen (s. S. 767).

Die Gewinnung der Oxy- und Aminoazoverbindungen möge hier noch an einigen praktischen Beispielen erläutert werden, während sich der theoretische Verlauf der Reaktion aus dem früher (S. 752ff.) Gesagten ergibt.

p-Oxyazobenzol stellt man dar, indem man eine Lösung von 9 g Anilin in ca. 200 ccm Wasser und soviel starker Salzsäure als 9,1 HCl entspricht, unter Eiskühlung mit einer Lösung von 7 g Natriumnitrit in 50 ccm Wasser diazotiert und diese Lösung nach kurzem Stehen unter Eiskühlung in eine eiskalte Lösung von 9,4 g Phenol und 16 g festem Natriumhydroxyd in ca. 250 ccm Wasser einfließen läßt. Nach einigen Stunden fällt man das Oxyazobenzol aus der filtrierten Lösung durch Einleiten von Kohlensäure.

Aehnlich erhält man p-Dimethylaminoazobenzol-p'-sulfosäure, den unter dem Namen Helianthin oder Methylorange namentlich als Indikator in der Alkalimetrie verwendeten Farbstoff als Natriumsalz, wenn man eine Lösung von 10 g Sulfanilsäure (p-Aminobenzolsulfosäure) in einer Lösung von 3,5 g wasserfreier Soda in 150 ccm Wasser löst, durch Zusatz von 4,2 g Natriumnitrit in 20 ccm Wasser und dann von soviel verdünnter Salzsäure, als 2,5 g HCl entspricht, unter Eiskühlung diazotiert und diese Lösung in eine solche von 7 g Dimethylanilin in soviel verdünnter Salzsäure, als 2,1 g HCl entspricht, einträgt. Dann macht man mit Natronlauge deutlich alkalisch und setzt zur

völligen Abscheidung noch etwa 25 g fein pulverisiertes Kochsalz zu.

Zur Darstellung von p-Aminoazobenzol erwärmt man eine Mischung von 10 g feingepulverten Diazoaminobenzol (s. S. 758) und 5 g gepulvertem Anilinchlorhydrat mit 25 g Anilin etwa eine Stunde lang unter Umrühren auf etwa 45° und verreibt so lange mit verdünnter Essigsäure, bis sich das Aninoazobenzol als vollkommen fester Niederschlag abgeschieden hat.

Sulfuriert man p-Aminoazobenzol, so entsteht ein Gemenge von Mono- und Disulfosäure, daß als Säuregelb oder Echtgelb in der Wollfärberei verwendet wird. In ganz analoger Weise werden die technisch wichtigen Azofarbstoffe dargestellt, von denen insbesondere die vom Naphtalin abgeleiteten wichtig sind. Als Beispiele seien die folgenden genannt. Diazotierte Sulfanilsäure liefert beim Kuppeln mit α- oder β-Naphtol die als Naphtolorange oder Tropäolin bekannten Farbstoffe. Aus diazotierter α-Naphtylamin-p-sulfosäure entsteht mit β-Naphtol analog das wertvolle Echtrot, und ähnlich erhält man durch Kuppelung mit Naphtoldisulfosäuren die unter dem Namen Ponceaux und Bordeaux in den Handel gebrachten Farbstoffe.

Die Bildung von Azofarbstoffen kann man sehr gut benutzen, um eine unbekannte Base als primäres aromatisches Amin zu erweisen, indem man eine Lösung von etwa 0,7 g der fraglichen Base in 3 ccm starker Salzsäure unter Eiskühlung so lange mit Natriumnitritlösung versetzt, bis die Lösung Jodkaliumstärkepapier bläut, und in eine mit überschüssiger Soda und Kochsalz versetzte Lösung von R-Salz (Natriumsalz der β-Naphtol-α-Disulfosäure) eingießt. Lag eine primäre aromatische Base vor, so scheidet sich hierbei ein roter Farbstoff ab. Unter Verwendung von titrierter R-Salz-Lösung oder Naphtollösung kann man primäre aromatisch gebundene Aminogruppen auf diese Weise auch quantitativ bestimmen.

Es ist schon vorher (S. 759) gesagt worden, daß beim Behandeln einer Diazoaminoverbindung mit einem anderen, als dem schon in ihrem Molekül gebundenen Amin ein Austausch eintreten kann und daß man beim Erwärmen von Diazoaminoverbindungen mit Phenolen Oxyazokörper erhält. Außerdem existieren aber noch einige weniger wichtige Bildungsweisen für Oxyazoverbindungen, die der Vollständigkeit wegen erwähnt werden mögen. So entstehen Oxyazokörper beim Erhitzen von Azoxyverbindungen (s. S. 770) mit Schwefelsäure durch Umlagerung,

$$\underset{\text{Azoxybenzol}}{C_6H_5.N \overset{O}{—} N.C_6H_5}$$

$$\longrightarrow \underset{\text{p-Oxyazobenzol}}{C_6H_5.N = N.C_6H_4.OH}$$

oder aus Nitrosophenolen (oder Chinonoximen vgl. den Artikel „Ammoniakderivate“ S. 298) mit primären aromatischen Aminen

$$C_6H_5.NH_2 + ON.C_6H_4.OH = C_6H_5.N:N.C_6H_5.OH + H_2O$$

Ferner kann man in den Aminoazoverbindungen die primäre Aminogruppe wiederum diazotieren und nach dem früher (S. 755) gesagten gegen eine Hydroxylgruppe austauschen. Schließlich kann man symmetrische Dioxyazobenzole oder deren Aether aus Nitrophenolen oder Nitrophenoläthern durch Reduktion, sowie aus Aminophenolen oder Aminophenoläthern durch Oxydation nach den allgemeinen Darstellungsmethoden für Azokörper (s. S. 762) erhalten.

Von besonderem theoretischen Interesse ist es, daß man gewisse Oxyazokörper auch aus Chinonen mit Phenylhydrazinen erhält. Hierauf wird bei der Besprechung der Konstitution der Oxyazokörper (S. 766) noch näher eingegangen werden.

Eigenschaften und Verhalten der Oxy- und Aminoazokörper. Die wichtigste Eigenschaft der Oxy- und Aminoazokörper ist ihre Verwendbarkeit als Farbstoffe, d. h. sie sind nicht nur intensiv gefärbt sondern besitzen auch die Eigenschaft sich mit manchen Gespinnstfasern fest zu vereinigen. Hierbei spielt die Azogruppe die Rolle einer „chromophoren Gruppe“, während die Hydroxyl- bezw. Aminogruppe als „auxochrome Gruppe“ wirkt (vgl. S. 762). Ihre näheren Eigenschaften in dieser Beziehung werden im Artikel „Farbstoffe“ (Azofarbstoffe) besprochen. Natürlich sind, entsprechend ihrer Natur als Phenole, die Oxyazokörper saure Verbindungen, d. h. sie lösen sich in wässerigen Laugen und werden aus dieser Lösung durch Säuren (auch durch Kohlensäure) wieder gefällt, während die Aminoazokörper als Amine basischer Natur sind, d. h. mit Mineralsäuren Salze (die technischen Aminoazofarbstoffe) bilden. Einige o-Oxyazoverbindungen sind jedoch in Laugen wenig oder gar nicht löslich. Andererseits bilden übrigens Oxyazoverbindungen in Benzol Anlagerungsprodukte mit Salzsäure, doch sind dieselben namentlich bei den o-Oxyazokörpern ziemlich unbeständig. Die freien Oxy- und Aminoazokörper sind in Alkohol meist leicht löslich und kristallisieren gut. Im Wasser sind sie wenig löslich. Natürlich ändern sich ihre Eigenschaften durch Einführung anderer Gruppe z. B. der Sulfosäuregruppe unter Umständen wesentlich.

Die Aminoazokörper können wie alle Azokörper durch Reduktionsmittel in Hydrazoverbindungen übergeführt oder an der Stelle der doppelten Bindung gespaltet werden. Bei letzterer Reaktion (vgl. S. 762) liefern die Monaminoazokörper neben einem Molekül Monamin je nach ihrer Konstitution ein Molekül p- oder o-Diamin z. B.

$$C_6H_5.N{=}N.C_6H_4.NH_2 \longrightarrow C_6H_5.NH_2 + NH_2.C_6H_4.NH_2$$

Man benutzt daher die reduktive Spaltung der Aminoazokörper zur Aufklärung ihrer Konstitution sowie zur Gewinnung von Diaminen. Wie schon mehrfach erwähnt, läßt sich die primäre Aminogruppe von Aminoazokörpern wiederum diazotieren. Aus den so erhaltenen Azodiazoniumsalzen kann man durch erneute Kuppelung mit Aminen oder Phenolen Disazokörper (S. 767) sowie nach den bekannten Methoden Azobenzole (S. 762) Oxyazobenzole (S. 764) und die übrigen Umwandlungsprodukte der Diazoniumsalze (vgl. S. 755) gewinnen. Die aus o-Aminoazoverbindungen durch Diazotierung entstehenden Azobenzol-o-Diazoniumsalze liefern bei der Reduktion heterozyklische Verbindungen, die sogenannten Isophendihydrotetrazine

$$C_6H_4(N{:}NCl)(N{:}N.Ar) \longrightarrow C_6H_4\begin{matrix}N-NH\\ N-N.Ar\end{matrix}$$

Beim Erhitzen mit Anilinchlorhydrat geben die Aminoazoverbindungen in komplizierter Reaktion andere wichtige Farbstoffe, die aber nicht mehr zu den Azokörpern gehören; und zwar entstehen aus den p-Aminoazoverbindungen Induline, aus den o-Aminoazoverbindungen Eurhodine (vgl. den Artikel „Farbstoffe“).

$$C_6H_5.N{=}N.C_6H_4.NH_2 + NH_2C_6H_5 \longrightarrow HN{=}C_6H_3\begin{matrix}N\\ N(C_6H_5)\end{matrix}C_6H_4$$

Indulinbase

$$Ar.N{=}N.C_6H_4.NH_2 + C_6H_5.NH_2 \longrightarrow C_6H_4\begin{matrix}N\\ NH\end{matrix}C_6H_3{=}NH$$

Eurhodinbase

(Es sei hier nebenbei bemerkt, daß die Indulinsalze durch Diazotierung und Entamidierung in sogenannte Azoniumsalze übergeführt werden, die aber nicht, wie man aus dem Namen schließen könnte, zu den Azokörpern gehören (vgl. S. 746).

Die primäre Aminogruppe der p-Aminoazoverbindungen reagiert mit Aldehyden genau so wie diejenige der einfachen primären aromatischen Amine, d. h. unter Bildung indifferenter Kondensationsprodukte, die zu den Anilen (vgl. den Artikel „Ammoniakderivate“ S. 280) zu rechnen sind und sich leicht wieder in die Komponenten zerlegen lassen

$$C_6H_5.N{:}N-C_6H_4-NH_2 + OCH.C_6H_5$$
$$=C_6H_5.N{:}N-C_6H_4-N{:}CH.C_6H_5 + H_2O$$

Benzalaminoazobenzol.

Die o-Aminoazoverbindungen geben dagegen mit Aldehyden farblose, beständige Kondensationsprodukte basischer Natur, welche zu den heterozyklischen Verbindungen gehören und als Phendihydro-α-triazine bezeichnet werden.

$$C_6H_4\begin{matrix}N{=}N.C_6H_5\\ NH_2\end{matrix} + OCH.C_6H_5 \longrightarrow C_6H_4\begin{matrix}N-N.C_6H_5\\ N-CH.C_6H_5\end{matrix} + H_2O$$

Schließlich lassen sich o-Aminoazoverbindungen durch Oxydation in die sogenannten Pseudoazimidoverbindungen überführen.

$$C_6H_4\begin{matrix}N{=}N.C_6H_5\\ NH_2\end{matrix} + O \longrightarrow C_6H_4\begin{matrix}N\\ N\end{matrix}N.C_6H_5 + H_2O$$

Die Oxyazokörper zeigen im allgemeinen die Reaktionsfähigkeit des freien Phenolhydroxyls, doch wurde schon vorher (S. 764) bei der Alkalilöslichkeit erwähnt, daß dies bei den o-Oxyazoverbindungen nicht immer der Fall ist. In ähnlicher Weise bilden die p-Oxyazokörper mit Phenylisocyanat die normalen Urethane (vgl. den Artikel „Ammoniakderivate“ S. 279), während die o-Oxyazoverbindungen gegen dies Agens indifferent sind. Bei der Reduktion mit Zinnchlorür und Salzsäure zerfallen alle Oxyazokörper ebenso wie die Aminoazokörper (s. S. 764) an der Stelle der doppelten Bindung und liefern ein Gemisch von Aminen und Aminophenolen. Die Alkalisalze der Oxyazokörper liefern mit Halogenalkylen glatt die entsprechenden Azophenoläther, die bei der Reduktion analog zerfallen.

Die Konstitution der Amino- und Oxyazokörper. Ebenso wie p-Nitrosophenol und Chinonmonoxim nicht zwei verschiedene Verbindungen sind, sondern, wie die eine Verbindung, die man sowohl durch Nitrosierung des Phenols als auch durch Oximierung des Chinons erhalten kann, gegen manche Agentien als Nitrosophenol gegen andere aber als Chinonmonoxim, also nach den beiden tautomeren Formeln

OH ... N:O ⟷ O ... N.OH

reagieren kann (vgl. den Artikel „Ammoniakderivate" S. 299), so ist auch für die p-Amino- und Oxy-azokörper eine Tautomerie im Sinne der beiden Formelpaare

NH_2 ... $N:N.C_6H_5$ p-Aminoazobenzol ⟷ NH ... $N.NH.C_6H_5$ Chinonimidphenylhydrazon

OH ... $N:N.C_6H_5$ p-Oxyazobenzol ⟷ O ... $N.NH.C_6H_5$ Chinonmonophenylhydrazon

und für die o-Amino- und Oxy-azokörper im Sinne der Formelpaare

NH_2, $N:N.C_6H_5$ o-Aminoazobenzol ⟷ NH, $N.NH.C_6H_5$ o-Chinonimidphenylhydrazon

OH, $N:N.C_6H_5$ o-Oxyazobenzol ⟷ O, $N.NH.C_6H_5$ o-Chinonmonophenylhydrazon

in Betracht zu ziehen. Danach müßte man auch hier erwarten, daß dieselbe Substanz entsteht, gleichgültig, ob man z. B. Phenylhydrazin auf Chinon einwirken läßt oder ob man Benzoldiazoniumchlorid mit Phenol kuppelt. Nun läßt sich die erstere Reaktion zwar bei dem gewöhnlichen Chinon nicht verwirklichen, weil Phenylhydrazin lediglich reduzierend auf Chinon einwirkt, aber in bestimmten Fällen zeigt sich doch, daß obige Voraussetzung in der Tat richtig ist. So entsteht die gleiche Verbindung sowohl aus β-Naphtochinon mit Nitrophenylhydrazin als auch aus α-Naphtol mit Nitrobenzoldiazoniumchlorid (neben der entsprechenden p-Verbindung vgl. S. 763).

Eine Tautomerie in dem gedachten Sinne zwischen o- oder p-Chinonhydrazonen oder Chinonimidhydrazonen und Oxy- oder Aminoazokörpern ist also wirklich vorhanden und auch bei den übrigen analogen Verbindungen zeigt sich, daß dieselben bei manchen Reaktionen als Hydrazone, bei anderen als Oxy- oder Aminoazokörper reagieren (vgl. S. 764ff.). Namentlich die Unlöslichkeit mancher o-Oxyazokörper in Alkali und die Ringkondensationen der o-Oxy- und o-Aminoazokörper

O, :O (Naphtochinon) + $H_2N.NHC_6H_4.NO_2$ → O, $:N.NH.C_6H_4NO_2$

identisch ↕ mit

OH (Naphtol) + $ClN:N.C_6H_4.NO_2$ → OH, $.N:N.C_6H_4NO_2$

scheinen für die Hydrazonstruktur zu sprechen, während das Verhalten der p-Oxy- und p-Aminoverbindungen im allgemeinen besser der Azoformel entspricht. Es erhebt sich nun die Frage, ob man etwa für die o- und die p-Verbindungen verschiedene Strukturen annehmen soll und, wenn man die angeführten Verschiedenheiten auf Tautomerie zurückführt, d. h. wenn man annimmt, daß die gleiche Verbindung unter verschiedenen Verhältnissen nach verschiedenen Strukturformeln reagieren kann, ob die freien Ver-

bindungen selbst in der Hydrazonform oder in der Azoform vorliegen. Hierüber ist lange diskutiert worden, es kann aber jetzt, abgesehen von der Auffassung aller tautomerer Verbindungen als Gleichgewichtsgemische beider möglicher Formen, als bewiesen gelten, daß die Kuppelungsprodukte aus Diazoniumsalzen mit aromatischen Aminen oder Phenolen stets als wahre Azokörper aufzufassen sind. Wie früher (S. 760) ausgeführt wurde, ist man betreffs der Kuppelungsprodukte von Diazoniumsalzen mit aliphatischen Verbindungen gerade zu der entgegengesetzten Ansicht gelangt. Bei den Kuppelungsprodukten mit heterozyklischen oder alizyklischen Verbindungen (s. S. 758 und 763) läßt sich diese Frage nicht allgemein entscheiden, vielmehr sind hier manche Verbindungen als Azokörper, andere wiederum als Hydrazone erkannt worden. Es soll schließlich nicht unerwähnt bleiben, daß die hier geäußerte Auffassung von der Konstitution der Oxy- und Aminoazokörper immerhin noch von einigen Chemikern angezweifelt wird. Die besprochene Tautomerie, die ja wie immer auf dem Platzwechsel eines Wasserstoffatoms beruht, kann natürlich nur dann auftreten, wenn an der betreffenden Stelle des Moleküls wirklich ein Wasserstoffatom vorhanden ist, nicht aber wenn dasselbe durch eine andere Gruppe substituiert worden ist. So können einerseits die Azophenoläther Alk.O.C_6H_4.N:N.Ar und die Azokörper aus tertiären Aminen $(Alk)_2N.C_6H_4.N:N.Ar$ natürlich nur in der Azoform und andererseits die aus asymmetrischen Acylphenylhydrazinen gewonnenen Chinonhydrazone

$$O:C_6H_4:N.N\langle{}^{Ac}_{Ar}$$

nur in der Hydrazonform reagieren und existieren.

3e) **Disazokörper, Trisazokörper usw.** Disazokörper welche die Azogruppe zweimal im selben Molekül enthalten, sind zum Teil für die Farbstofftechnik von außerordentlich großer Bedeutung geworden, da sich in dieser Reihe wertvolle substantive Farbstoffe, die ungebeizte Baumwolle anfärben, sowie vorzügliche Wollfarbstoffe gefunden haben. Auch hier sind es in erster Linie wiederum die Sulfosäuren der Disazokörper, welche sich als Farbstoffe in der Praxis bewährt haben. Da die Disazoverbindungen drei aromatische Kerne im Molekül enthalten, benennt man sie zur Erreichung einer eindeutigen chemischen Bezeichnung stets so, daß man den Namen des zwischen den beiden Azogruppen stehenden Kernes voransetzt; ihm folgt zunächst das Stammwort „Disazo“ und dann nacheinander noch die Namen der beiden an den Enden der Disazogruppe —N = N.Ar.N = N— stehenden Komplexe, wobei man alle drei aromatischen Komplexe nicht als Reste (z. B. Phenyl-) sondern als vervollständigte Wasserstoffverbindungen (z. B. Benzol-) bezeichnet z. B.

$$C_{10}H_7.N:N.C_6H_4.N:N.C_6H_4.N(CH_3)_2$$

Benzoldisazo-naphtalin-dimethylanilin.

Die Herstellung von Disazoverbindungen kann nach verschiedenen Methoden geschehen. Zunächst kann man in den Aminoazoverbindungen, wie schon erwähnt (S. 765) die primäre Aminogruppe von neuem diazotieren

$$C_6H_5.N:N.C_6H_4.NH_2,\ HCl + HNO_2 = C_6H_5.N:N.C_6N_4.N_2Cl + 2H_2O$$

und die so hergestellte Azodiazoniumverbindung genau ebenso wie ein einfaches Diazoniumsalz mit einem aromatischen Amin oder einem Phenol kuppeln (s. S. 762). So erhält man durch Kuppelung von diazotiertem Aminoazobenzol mit Anilin das Benzoldisazobenzolanilin $C_6H_5.N:N.C_6H_4.N:N.C_6H_4.NH_2$. In diesem läßt sich die Aminogruppe wiederum diazotieren und in bekannter Weise (vgl. S. 755) eliminieren. Man erhält so den einfachsten bekannten Disazokörper des Benzoldisazobenzol.

$$C_6H_5.N:N.C_6H_4.N:N.C_6H_5.$$

Nach dieser Methode werden z. B. durch erneute Diazotierung von Aminoazonaphtalinsulfosäuren und Kuppelung mit einer Naphtolsulfosäuren die wichtigen „Naphtolschwarz“-Sorten und andere wertvolle schwarze Wollfarbstoffe dargestellt und ähnlich gewinnt man durch erneute Diazotierung von Aminoazobenzolsulfosäuren und Kuppelung mit Naphtol oder Naphtolsulfosäure die schönen unter dem Namen Croceïnscharlach 3 B und Biebricher Scharlach bekannten roten Farbstoffe.

Andererseits kann man Diaminoazoverbindungen, die zwei Aminogruppen im selben Kern in m-Stellung zueinander enthalten und die man aus m-Phenylendiamin und seinen Derivaten durch Kuppelung mit Diazoniumsalzen erhält (vgl. S. 758) noch mit einem zweiten Molekül Diazoniumsalz kuppeln. So liefert das sogenannte Chrysoïdin (2,4-Diaminoazobenzol)

$$C_6H_5.N:N\langle\bigcirc\rangle NH_2 \quad (NH_2 \text{ in 2-Stellung})$$

mit Benzoldiazoniumsalz m-Phenylendiamindisazobenzol $(C_6H_5.N:N)_2C_6H_2(NH_2)_2$.

Eine analog aus Chrysoïdinsulfosäure dargestellte Sulfosäure dieses Disazokörpers bildet als Natriumsalz das sogenannte Säurebraun G.

Daß Oxy- und Aminonaphtaline, in denen o- und p-Stellung unbesetzt sind, unter Umständen direkt zwei Moleküle Diazoniumsalz zu Disazoverbindungen kuppeln können, ist schon erwähnt worden (S. 763).

Wichtiger noch als diese Methoden ist namentlich für die Farbstofftechnik diejenige, die sich darauf gründet, daß man in aromatischen Diaminen beide primären Aminogruppen diazotieren kann. Man spricht in solchen Fällen auch von einer „Tetrazotierung" des Diamins. Von den Phenylendiaminen und Naphtylendiaminen lassen sich nur die m- und p-Diamine und auch diese nur unter bestimmten Bedingungen (s. S. 754) tetrazotieren, während die o- bezw. peri-Diamine mit salpetriger Säure die sehr beständigen Azimide liefern. Von größter technischer Bedeutung sind aber insbesondere diejenigen Disazokörper, die man durch Kuppelung von tetrazotiertem Benzidin (Di-p-diaminodiphenyl; vgl. den Artikel „Ammoniakderivate" S. 303) und von analogen Tetrazoverbindungen aus o-Tolidin, o-Dianisidin, o-Aethoxy- und o,o-Diäthoxybenzidin sowie deren Sulfosäuren mit Aminen, Phenolen und deren Sulfosäuren erhält. Die Anzahl der so erhältlichen Disazoverbindungen läßt sich, abgesehen von der Verwendung verschiedener Ausgangsmaterialien, noch weiter dadurch vermehren, daß man das tetrazotierte Benzidin sowohl gleichzeitig mit zwei gleichen Komplexen als auch nacheinander mit zwei untereinander verschiedenen Komplexen kuppeln kann. So kann man symmetrische

$$X.N:N.C_6H_4.C_6H_4.N:N.X$$

und unsymmetrische Disazoverbindungen

$$X.N:N.C_6H_4.C_6H_4.N:N.Y$$

darstellen.

Die nach diesem Verfahren erhaltenen Farbstoffe sind substantive Baumwollfarbstoffe, d. h. sie besitzen die wertvolle Eigenschaft ungebeizte Baumwolle anzufärben. Man bezeichnet sie als „Congofarbstoffe", weil der älteste und wichtigste Repräsentant dieser Klasse, der aus tetrazotiertem Benzidin mit 2 Molekülen Naphtionsäure entsteht,

NH_2 — N:N — — N:N — NH_2

SO_3H SO_3H

den Namen Congorot führt. Analoge Farbstoffe sind jetzt fast in allen möglichen Farbnuancen bekannt.

Auch Farbstoffe mit noch mehr als zwei Azogruppen kennt und verwendet man.

So ist das sogenannte Diamingrün G ein Trisazokörper, der entsteht, wenn man tetrazotiertes Benzidin einerseits mit 1 Molekül Salicylsäure und dann andererseits mit einem Molekül p-Nitrobenzolazo-aminonaphtoldisulfosäure-H kuppelt. Noch höhere Azofarbstoffe erhält man z. B. wenn man das Diaminschwarz R. O., das zur Reihe der Congofarbstoffe gehört und aus tetrazotiertem Benzidin durch Kuppeln mit Aminonaphtolsulfosäure-G entsteht, also die Konstitution

OH OH

H_2N — N:N — — N:N — NH_2

SO_3H HO_3S

hat, wiederum diazotiert und von neuem kuppelt, was auf der Faser selbst ausgeführt wird.

4. **Azoxyverbindungen.** Die Azoxykörper (vgl. S. 747) enthalten die Gruppe

$$-N\overset{O}{\frown}N-$$

beiderseitig an aromatische Kerne gebunden, wenigstens wird diese Konstitution gewöhnlich angenommen. Von anderer Seite wird für dieselben auch die Formulierung

$$Ar-N=\underset{\underset{O}{\|}}{N}-Ar$$

vorgeschlagen, welche die Umsetzungen der Azoxyverbindungen ebensogut erklärt. Zwischen beiden Formeln ist eine experimentelle Entscheidung bisher noch nicht getroffen worden.

Bildungsweisen. Zur Darstellung von Azoxyverbindungen benutzt man fast ausschließlich die Reduktion von aromatischen Nitroverbindungen, seltener von Nitrosoverbindungen. Diese Reduktion, die in saurer Lösung meist zu den Endprodukten der Reduktion, den Aminen, führt, läßt sich in alkalischer Lösung unter geeigneten Bedingungen so leiten, daß unter Verkettung zweier Moleküle eine Azoxyverbindung entsteht.

$$\begin{matrix} Ar.NO_2 \\ Ar.NO_2 \end{matrix} \xrightarrow{6H} \begin{matrix} Ar.N \\ | \\ Ar.N \end{matrix} \rangle O + 3H_2O$$

Als geeignetes Reduktionsmittel für den vorliegenden Fall hat sich wasserfreier Methylalkohol oder Aethylalkohol bei Gegenwart von Kaliumhydrat oder Natriumhydrat erwiesen. Der Alkohol wird hierbei zu Ameisensäure bezw. Essigsäure oxydiert, die vom Alkali gebunden wird und zwar wirkt Aethylalkohol stärker reduzierend als Methylalkohol. Auch die Natur des Alkalis ist nicht ohne Einfluß, indem Kali stärker wirkt als Natron. Um

die alkoholische Lösung möglichst wasserfrei zu halten, verwendet man oft zweckmäßig eine Lösung von metallischem Natrium in dem Alkohol.

Zur Darstellung von Azoxybenzol kocht man 30 g Nitrobenzol mit einer Lösung von 20 g Natriummetall in 200 ccm Methylalkohol 6 Stunden am Rückflußkühler, destilliert den Alkohol ab und nimmt den Rückstand mit Wasser auf, wobei sich das Azoxybenzol als Oel abscheidet, das in der Kälte kristallinisch erstarrt.

Erwähnenswert ist, daß diese Reduktion anormal verläuft, wenn das Ausgangsmaterial in p-Stellung zur Nitrogruppe eine Methylgruppe enthält. In diesem Falle wirkt der Wasserstoff der Methylgruppe teilweise selbst als Reduktionsmittel, so daß Verkettung zweier Moleküle durch die Methylgruppen eintritt. Es entstehen dadurch Nitro-, Nitroso- oder Azoxyderivate des Dibenzyls $C_6H_5.CH_2.CH_2.C_6H_5$ und Stilbens $C_6H_5.CH:CH.C_6H_5$.

Auch andere Reduktionsmittel, wie Natriumamalgam und Alkohol, Zinkstaub mit alkoholischem Ammoniak oder arsenige Säure in alkoholischer Lösung haben sich für die Gewinnung von Azoxyverbindungen als brauchbar erwiesen.

Bei der Reduktion von Nitroverbindungen entstehen natürlich nur symmetrische Azoxyverbindungen, d. h. solche, in denen die Azoxygruppe mit zwei gleichen Resten verbunden ist. So erhält man Azoxyphenole

$$HO.C_6H_4.N \overset{O}{—} N.C_6H_4OH$$

und Azoxyphenoläther

$$Alk.O.C_6H_4.N \overset{O}{—} N.C_6H_4.O.Alk$$

analog durch vorsichtige Reduktion von Nitro- oder Nitroso-phenolen und -phenoläthern, Azoxybenzoesäuren aus Nitrobenzoesäuren usw. Unsymmetrische Azoxyverbindungen kennt man bisher nur soweit, als sie sich durch Substitution aus den symmetrischen erhalten lassen. Beispielsweise liefert Azoxybenzol bei der Nitrierung Mononitroazoxybenzol.

$$NO_2.C_6H_4.N \overset{O}{—} N.C_6H_5$$

Entsprechend der Auffassung der Azoxyverbindungen als der Zwischenprodukte bei der Reduktion der Nitroverbindungen zu Aminen kann man dieselben auch umgekehrt durch Oxydation von Azoverbindungen oder Aminoverbindungen erhalten. So kann man Anilin in alkoholischer Lösung mit Kaliumpermanganat zu Azoxybenzol oxydieren.

$$\begin{matrix} C_6H_5.NH_2 \\ C_6H_5.NH_2 \end{matrix} \xrightarrow{3O} \begin{matrix} C_6H_5.N \\ | \\ C_6H_5.N \end{matrix} \rangle O + 2H_2O$$

Außerdem erhält man Azoxybenzol bei der freiwilligen Oxydation von wässerigen Phenylhydroxylaminlösungen an der Luft. Hierbei entsteht primär Nitrosobenzol (I), das sich sekundär mit dem noch in der Lösung befindlichen Phenylhydroxylamin zu Azoxybenzol vereinigt (II).

$$\text{I.}\quad C_6H_5.N\langle^{H}_{OH} + O = C_6H_5.N:O + H_2O$$

$$\text{II.}\quad \begin{matrix} C_6H_5.N:O \\ + C_6H_5.N\langle^{H}_{OH} \end{matrix} = \left|\begin{matrix} C_6H_5.N-OH \\ C_6H_5.N-OH \end{matrix}\right| = \begin{matrix} C_6H_5.N \\ | \\ C_6H_5.N \end{matrix} \rangle O + H_2O.$$

Diese Reaktion wird verlangsamt, wenn das Arylhydroxylamin in o- und p-Stellung zur NHOH-Gruppe Methylgruppen enthält und tritt beim Mesitylhydroxylamin gar nicht mehr ein, was man auf sogenannte „sterische Hinderung" zurückführt.

Sehr glatt geht α-Naphtylhydroxylamin beim Schmelzen in $\alpha\alpha$-Azoxynaphtalin über. Schließlich entsteht Azoxybenzol auch neben Azobenzol bei der Umsetzung von Nitrobenzol mit Hydrazobenzol.

$$3C_6H_5.NH.NH.C_6H_5 + 2C_6H_5NO_2 = 3C_6H_5.N:N.C_6H_5 + C_6H_5.N \overset{O}{—} N.C_6H_5 + 3H_2O.$$

Eigenschaften und Umsetzungen. Die Azoxyverbindungen sind gelbgefärbte indifferente Verbindungen, die sich bei der Destillation teilweise zersetzen. Sie sind in Wasser unlöslich, lösen sich aber leicht in Alkohol und Aether und kristallisieren gut.

Die p-Azoxyphenoläther zeigen eine interessante Eigenschaft, die man auch in einigen anderen Körperklassen beobachtet hat, besonders gut. Sie bilden nämlich sogenannte flüssige oder fließende Kristalle. Erhitzt man z. B. p-Azoxyphenetol

$$C_2H_5OC_6H_4.N \overset{O}{—} N.C_6H_4OC_2H_5$$

so schmilzt es zunächst bei 134° zu einer trüben Flüssigkeit, die erst bei 165° plötzlich klar wird. Erstere Temperatur bezeichnet man als Schmelzpunkt, letztere als Klärpunkt. Die zwischen beiden Temperaturen existierende Flüssigkeit zeigt nun gewisse optische Eigenschaften, welche sonst nur bei Kristallen beobachtet werden. Obwohl man in der Flüssigkeit auch unter dem Mikroskop keine Kristalle sehen kann, ist dieselbe nicht wie normale Flüssigkeiten optisch isotrop, sondern anisotrop und zeigt zwischen gekreuzten Nikols in konvergentem Licht die charakteristischen Figuren, die man sonst bei doppelbrechenden Kristallen beobachtet.

Die Azoxyverbindungen lassen sich leicht weiter reduzieren. Wenn man sie mit trok-

kenen Eisenfeilspänen erhitzt, gehen sie in Azoverbindungen über (s. S. 762)

$$\begin{matrix} Ar.N \\ | \quad O \\ Ar.N \end{matrix} \xrightarrow{Fe} \begin{matrix} Ar.N \\ \| \\ Ar.N \end{matrix} + FeO$$

Mit Schwefelammonium kann man die Azoxyverbindungen zu Hydrazokörpern (vgl. den Artikel „Ammoniakderivate" S. 301) reduzieren.

$$\begin{matrix} Ar.N \\ | \quad O \\ Ar.N \end{matrix} \xrightarrow{4H} \begin{matrix} Ar.NH \\ | \\ Ar.NH \end{matrix} + H_2O$$

während mit sauren Reduktionsmitteln Gemische von Aminen entstehen, die teils Spaltungs- teils Umlagerungsprodukte (vgl. den Artikel „Ammoniakderivate" S. 303) der primär entstandenen Hydrazoverbindungen sind.

$$\begin{matrix} Ar.N \\ | \quad O \\ Ar.N \end{matrix} \rightarrow \left[\begin{matrix} Ar.NH \\ Ar.NH \end{matrix}\right] \rightarrow \begin{matrix} 2\,Ar.NH_2 \\ NH_2.Ar.Ar.NH_2 \end{matrix}$$

Eine sehr merkwürdige Reaktion ist die schon erwähnte (S.764) Umlagerung von Azoxyverbindungen in Oxyazokörper beim Erwärmen mit konzentrierter Schwefelsäure

$$C_6H_5.N \overset{O}{—} N.C_6H_5 \rightarrow C_6H_5.N:N.C_6H_4.OH.$$

5. Derivate der Stickstoffwasserstoffsäure und andere Verbindungen mit drei und mehr direkt zusammenhängenden Stickstoffatomen. Abgesehen von den heterozyklischen Verbindungen (vgl. den Art. „Heterozyklische Verbindungen"), welche drei oder vier direkt zusammenhängende Stickstoffatome als Ringglieder enthalten, den Osotriazolen oder Azimiden (s. S. 750; 754; 759; 765 und 772), den Osotriazinen, Tetrazolen (s. S. 761) und Osotetrazonen (s. S. 765), die hier nur gelegentlich erwähnt werden, kennt man nur relativ wenige organische Verbindungen, welche drei und mehr direkt zusammenhängende Stickstoffatome enthalten. Man kann sie als Substitutionsprodukte von Stickstoffwasserstoffverbindungen auffassen, welche letzteren selbst aber meist nicht bekannt sind. Die wichtigsten Körper dieser Gruppe, die Diazoaminoverbindungen, die als Derivate des unbekannten Stickstoffwasserstoffs H.N:N.NH_2 gelten können, sind aus praktischen Gründen schon früher (S. 758) im Anschluß an die Diazoverbindungen ausführlich behandelt worden.

5a) Derivate der Stickstoffwasserstoffsäure. Von den übrigen hierher gehörigen Verbindungen ist nur noch eine Gruppe von Bedeutung. Es sind das die organischen Derivate eines Stickstoffwasserstoffs N_3H, der auch in freiem Zustande bekannt ist und den Namen Stickstoffwasserstoffsäure führt. Die Konstitution dieser Stickstoffwasserstoffsäure wurde bisher allgemein entsprechend der Formel

$$H.N\left\langle\begin{matrix} N \\ \| \\ N \end{matrix}\right.$$

angenommen. Neuerdings hat aber Thiele für diese Verbindung die schon von Angeli vorgeschlagene Formel H.N:N:N mit sehr einleuchtenden Beweisgründen gestützt. Hierdurch werden die Derivate der Stickstoffwasserstoffsäure mit den Diazoniumverbindungen in Parallele gestellt, was ihren Bildungsweisen und ihrem Verhalten durchaus entspricht. Zwar ist der Thielesche Vorschlag so neu, daß eine Diskussion über denselben bisher nicht möglich war, doch läßt sich nicht verkennen, daß die neue Formel alle Reaktionen der Stickstoffwasserstoffsäure und ihrer Derivate ebensogut und zum Teil wesentlich besser erklärt, als die bisher angenommene.

Die freie Stickstoffwasserstoffsäure wird als rein anorganische Verbindung in dem Artikel „Stickstoff" ausführlicher behandelt werden, doch sei hier erwähnt, daß sie eine farblose, giftige Flüssigkeit von unangenehmem Geruch ist, die bei 37° siedet und, ebenso wie viele ihrer Salze, beim Erhitzen heftig explodiert. Sie ist nur schwach dissoziiert und in Lösung ziemlich beständig. Man erhält die freie Säure durch Destillation ihres Blei- oder Natriumsalzes mit verdünnter Schwefelsäure.

Die Stickstoffwasserstoffsäure oder ihre Salze (Metallazide) entstehen bei der Einwirkung von salpetriger Säure auf Hydrazin,

$$H_2N.NH_2 + HO.NO = N_3H + 2H_2O$$

oder aus Hydrazin und Chlorstickstoff in Benzol bei Gegenwart von etwas Natronlauge

$$H_2N.NH_2 + NCl_3 = N_3H + 3HCl.$$

Auch bei der Einwirkung von Stickoxydul auf Natriumamid erhält man stickstoffwasserstoffsaures Natrium.

$$NaNH_2 + N_2O = NaN_3 + H_2O.$$

Kleinere Mengen von Stickstoffwasserstoffsäure erhält man am bequemsten beim Behandeln von p-Nitrodiazobenzolimid (vgl. S. 771 und 772) mit alkoholischer Kalilauge.

Auch beim Kochen von Benzazid mit Alkali (S. 772) entsteht Stickstoffwasserstoffsäure, die auf diese Weise von Curtius entdeckt wurde.

Die Derivate der Stickstoffwasserstoffsäure, in denen deren Wasserstoffatom durch einen organischen Rest ersetzt ist, bezeichnet man als Azide oder auch Azoimide (vgl. S. 747) und zwar kennt man Acidylderivate, die sogenannten Säureazide, und Alkyl-

derivate, die man meist als *Alkylazide* oder als *Ester der Stickstoffwasserstoffsäure* benennt. Die aromatischen Alkylazide, in denen die N_3-Gruppe direkt an einem aromatischen Kern steht, bezeichnet man wegen ihres nahen Zusammenhangs mit den Diazoverbindungen gewöhnlich als *Diazoimide* oder weniger gut als *Azoimide*.

Es möge hier noch besonders daran erinnert werden, daß weder die sogenannten *Azimide* (vgl. S. 754; 759 und 765) noch die *Azine* (vgl. „Ammoniakderivate" S. 305) Derivate der Stickstoffwasserstoffsäure sind.

Darstellung der Alkylazide und Diazoimide. Die aliphatischen Ester der Stickstoffwasserstoffsäure sind noch nicht sehr eingehend untersucht. Das *Methylazid* erhält man aus dem Natriumsalz der Stickstoffwasserstoffsäure mit Dimethylsulfat, d. h. durch gewöhnliche Veresterung. Außerdem kennt man noch Derivate der sogenannten *Azidofettsäuren*. Man erhält dieselben entweder analog, z. B. *Azidoessigsäureester* aus Jodessigester und Silberazid, bezw. aus Chloressigester und Natriumazid

$$N_3Ag + J.CH_2.COOC_2H_5 = N_3.CH_2.COOC_2H_5 + AgJ$$

oder aus den Estern bezw. Amiden der Diazofettsäuren mit Hydrazin (s. S. 750). So entsteht z. B. das *Hydrazid der Azidoessigsäure* aus Diazoessigsäureester

$$C_2H_5O_2C.CH\begin{matrix}N\\ \|\\ N\end{matrix} + 2H_2N.NH_2 = [H_2N.NH.CO.CH_2.N{=}N.NH.NH_2 + C_2H_5OH]$$

$$= H_2N.NH.CO.CH_2.N\begin{matrix}N\\ \|\\ N\end{matrix} + NH_3 + C_2H_5OH$$

oder nach der neuen Formulierung (s. S. 770)

$$C_2H_5O_2C.CH{:}N{\vdots}N + 2H_2N.NH_2 = [H_2N.NH.OC.CH_2.N{:}N.NH.NH_2 + C_2H_5OH] = H_2N.NH.CO.CH_2.N{:}N{\vdots}N + NH_3 + C_2H_5OH.$$

Sehr viel genauer bekannt sind die schon von *Peter Grieß* entdeckten *aromatischen Diazoimide*. Sie entstehen analog der Darstellung der Azidofettsäurehydrazide bei der Einwirkung von Hydrazin auf Diazoniumsalze unter Abspaltung von Ammoniak. Hierbei treten als Nebenprodukte Aniline und freie Stickstoffwasserstoffsäure auf, was darauf hindeutet, daß intermediär ein Derivat des sogenannten *Buzylens* $HN{:}N.NH.NH_2$ (s. S. 774) gebildet wird.

$$C_6H_5.N_2.SO_4H + H_2N.NH_2 \longleftarrow [C_6H_5.N{:}N.NH.NH_2 + H_2SO_4]$$

$$\longrightarrow \begin{cases} C_6H_5.N{:}N{\vdots}N + NH_3 \\ \text{Diazobenzolimid} \\ C_6H_5.NH_2 + N{\vdots}N{:}NH \end{cases}$$

Ganz ebenso verläuft die Bildung von *Diazobenzolimid* aus Benzoldiazoniumsulfat und Phenylhydrazin

$$C_6H_5.N_2.SO_4H + N_2H.NHC_6H_5 \rightarrow C_6H_5.N{:}N{\vdots}N + H_2SO_4 + NH_2.C_6H_5$$

Die wichtigste Darstellungsmethode für Diazoimide ist die Einwirkung von wässerigem Ammoniak auf Diazoperbromide (s. S. 756). So erhält man *p-Nitrobenzoldiazoimid* (vgl. S. 770), wenn man das aus diazotierten p-Nitranilin gewonnene Perbromid unter Eiskühlung vorsichtig in wässeriges Ammoniak einträgt.

$$NO_2.C_6H_4.N_2Br_3 + H_3N = NO_2.C_6H_4.N_3 + 3HBr.$$

Auch durch Einwirkung von Hydroxylamin auf Diazoniumsulfate lassen sich Diazoimide gut gewinnen (vgl. S. 757).

$$C_6H_5.N_2.SO_4H + NH_2OH \longrightarrow [C_6H_5.N{:}N.NHOH + H_2SO_4]$$

$$\longrightarrow C_6H_5.N\begin{matrix}N\\ \|\\ N\end{matrix} \text{ oder } C_6H_5.N{:}N{\vdots}N + H_2O.$$

Ferner entstehen Diazoimide, wenn man salpetrige Säure auf primäre Arylhydrazine einwirken läßt. Hierbei werden zunächst die sehr unbeständigen *Nitrosohydrazine* gebildet, die beim Erwärmen mit Alkalien oder Säuren in Wasser und Diazoimide zerfallen.

$$R.NH.NH_2 + HONO \longrightarrow R.N\begin{matrix}NO\\ \\ NH_2\end{matrix}$$

$$\longrightarrow R.N\begin{matrix}N\\ \|\\ N\end{matrix} + H_2O$$

Nach der neueren Formulierung (s. S. 770) dürfte der Vorgang folgendermaßen zu erklären sein

$$R.N\begin{matrix}NO\\ \\ NH_2\end{matrix} \longrightarrow R.NH.NH.NO \longrightarrow$$

$$R.NH.N{:}NOH \longrightarrow R.N{:}N{\vdots}N + H_2O.$$

Zur direkten Gewinnung von Diazoimiden läßt man zweckmäßig die salpetrige Säure in der Wärme und bei Gegenwart überschüssiger Säure auf das Arylhydrazin einwirken.

Schließlich entstehen Diazoimide noch aus Diazoniumsalzen mit Stickstoffwasserstoffsäure, mit Oximen oder auch mit Zinnchlorür.

Sehr merkwürdig verläuft eine Reaktion, die zu *o-Azidobenzaldehyden* führt. Diazotiert man o-Aminobenzaldoxime, so entstehen zunächst heterozyklische Verbindungen, die sogenannten *Indiazonoxime*, die sich mit Wasser oder Alkali leicht in o-Azidobenzaldehyde umlagern.

$$C_6H_4\begin{matrix}\diagup CH{:}NOH\\ \diagdown NH_2\end{matrix} \longrightarrow C_6H_4\begin{matrix}\diagup CH{:}NOH\\ \diagdown N_2Cl\end{matrix} \longrightarrow$$

$$\longrightarrow C_6H_4\begin{matrix}C\cdot NOH\\ \\ N\end{matrix}\!\!\!\!>N \longrightarrow C_6H_4\begin{matrix}CHO\\ N:N:N\end{matrix}$$

Eigenschaften und Umsetzungen der Alkylazide. Das Methylazid ist eine giftige, unangenehm riechende Flüssigkeit, die bei etwa 20° siedet und über 500° explodiert. Mit Methylmagnesiumjodid (vgl. unten) liefert es Diazoaminomethan (s. S. 760). Die Azidoessigsäure zerfällt beim Kochen mit Alkalien in Oxalsäure, Ammoniak und Stickstoff.

Die aromatischen Alkylazide sind indifferente, teils flüssige, teils feste Verbindungen von betäubendem Geruch. Bei höherem Erhitzen unter gewöhnlichem Druck explodieren sie, doch kann man z. B. Diazobenzolimid im Vakuum destillieren (Siedepunkt 59° bei 12 mm Druck).

Beim Kochen mit verdünnter Schwefelsäure zerfallen die Diazoimide — oft sehr glatt — in Stickstoff und p-Aminophenole, wobei offenbar als Zwischenprodukt Phenylhydroxylamin entsteht (vgl. den Artikel „Ammoniakderivate" S. 290).

$$C_6H_5.N\begin{matrix}N\\ \|\\ N\end{matrix} + \begin{matrix}H\\ \\ OH\end{matrix} \longrightarrow \left[C_6H_5.N\begin{matrix}H\\ \\ OH\end{matrix} + N_2\right]$$

$$\longrightarrow HO.C_6H_4.NH_2 + N_2.$$

Aehnlich verläuft wohl die Zersetzung beim Kochen mit Salzsäure, wobei unter Stickstoffabspaltung ein Gemenge von o- und p-Chloranilin entsteht. Die in o- oder p-Stellung nitriertem Diazobenzolimide zerfallen beim Kochen mit alkalischer Kalilauge teilweise in Nitrophenole und Stickstoffwasserstoffsäure (vgl. S. 770).

$$NO_2.C_6H_4.N_3 + KOH = NO_2.C_6H_4.OK + HN_3$$

Beim Erhitzen für sich zerfallen die o-Nitrobenzoldiazoimide in Stickstoff und o-Dinitrosobenzole.

Mit Alkylmagnesiumhalogeniden liefert Diazobenzolimid zunächst ein Salz

$$C_6H_5.N_2.N\begin{matrix}MgHal\\ Alk\end{matrix},$$

das mit Wasser eine Diazoaminoverbindung gibt (vgl. S. 759).

$$C_6H_5.N\begin{matrix}N\\ \|\\ N\end{matrix} \text{ oder } C_6H_5.N:N:N +$$

$$Alk.Mg.Hal \longrightarrow C_6H_5.N:N.N\begin{matrix}MgHal\\ Alk\end{matrix}$$

$$\xrightarrow{H_2O} C_6H_5.N:N.N\begin{matrix}H\\ Alk\end{matrix}$$

Mit β-Ketosäureestern und Malonestern liefert Diazobenzolimid Triazole, fünfgliederige heterozyklische Verbindungen z. B. mit Acetessigester:

$$C_6H_5N\begin{matrix}N\\ \|\\ N\end{matrix} \text{ oder } C_6H_5.N:N:N +$$

$$HCH\begin{matrix}CO.CH_3\\ COOC_2H_5\end{matrix}$$

$$\longrightarrow \left|C_6H_5.NH.N:N.CH\begin{matrix}CO.CH_3\\ COOC_2H_5\end{matrix}\right.$$

$$\longrightarrow \begin{matrix}C_6H_5.NH.N:N & \\ H_3C - C(OH) = & C.COOC_2H_5\end{matrix}$$

$$\longrightarrow \begin{matrix}C_6H_5.N.N:N & \\ | \quad\quad | & \\ H_3C.C = C.COOC_2H_5 & \end{matrix} + H_2O.$$

Solche Triazole entstehen auch bei der Addition von Diazobenzolimid an Acetylendicarbonsäureester.

Darstellung der Säureazide. Säureazide, und zwar sowohl aliphatische als auch aromatische stellt man durch Einwirkung von salpetriger Säure auf Säurehydrazide dar, eine Reaktion, die analog der entsprechenden Bildung der Alkylazide verläuft (s. S. 771). So erhält man Benzazid (Benzoylazoimid) bei der Einwirkung von Natriumnitrit und Essigsäure auf Benzoylhydrazin

$$C_6H_5.CO.NH.NH_2 + HONO = C_6H_5.CO.N_3 + 2H_2O.$$

Die Hydrazide von $\alpha\beta$-ungesättigten Säuren lassen sich nicht in Azide überführen sondern liefern mit salpetriger Säure Nitrosoderivate der durch Umlagerung entstandenen heterozyklischen Pyrazolidone.

$$\begin{matrix}X.CH:CH.CO\\ |\\ H_2N-NH\end{matrix} \longrightarrow \begin{matrix}X.CH.CH_2.CO\\ | \qquad\quad |\\ HN ——— NH\end{matrix}$$

Auch bei der Einwirkung von Diazoniumsalzen auf die Säurehydrazide entstehen Säureazide.

Von den aliphatischen Säureaziden sind bisher nur wenige Vertreter bekannt, die sich von Fettsäuren und von der Kohlensäure ableiten. Von letzterer sind das Diazid (Carbazid), das Azidamid (Carbaminsäureazid), der Azidomethylester und das Azidamidin bekannt. Es sei daran erinnert, daß das sogenannte Semicarbazid (vgl. den Artikel „Ammoniakderivate" S. 308) nicht ein Azid, sondern das Amidhydrazid der Kohlensäure ist. Genauer untersucht sind die Azide aromatischer Säuren.

Eigenschaften und Umsetzungen der Säureazide. Die Säureazide sind indifferente, flüssige oder niedrig schmelzende kristallinische Substanzen von stechendem Geruch, die beim Erhitzen explodieren. In Wasser sind sie unlöslich, in Alkohol und Aether dagegen leicht löslich. Beim Kochen mit Alkali zerfallen sie unter Bildung von Salzen der Stickstoffwasserstoffsäure und der betreffenden organischen Säure (s. S. 770).

Ein sehr merkwürdiges Verhalten zeigen die Säureazide beim Erhitzen mit Alkohol oder mit Wasser. In beiden Fällen entwickelt sich Stickstoff, indem beim Erhitzen mit Alkohol Urethane (I),

$$(I)\ X.CO.N_3 + C_2H_5OH = X.NH.CO.OC_2H_5 + N_2$$

beim Kochen mit Wasser symmetrische Dialkylharnstoffe (II) entstehen.

$$(II)\ 2X.CO.N_3 + 2H_2O = (X.NH)_2CO + CO_2 + H_2O + 2N_2$$

Diese eigenartigen Umwandlungen werden verständlich, wenn man in ihrem Verlauf eine der sogenannten „Beckmannschen Umlagerung" (vgl. den Artikel „Ammoniakderivate" S. 297) analoge Umlagerung annimmt. Zunächst addieren die Azide anscheinend unter Stickstoffabspaltung Alkohol (Ia) bezw. Wasser (IIa), wobei Hydroxamsäurester bezw. Hydroxamsäuren entstehen, ähnlich wie bei der Spaltung der Alkylazide in Stickstoff und Aminophenole (S. 772) als Zwischenprodukte anscheinend Hydroxylamine gebildet werden:

Ia) $X.CO.N\langle \begin{matrix} N \\ | \\ N \end{matrix} + \begin{matrix} H \\ | \\ OC_2H_5 \end{matrix} = X.CO.N \begin{matrix} H \\ \\ OC_2H_5 \end{matrix} + N_2$

IIa) $X.CO.N \begin{matrix} N \\ | \\ N \end{matrix} + \begin{matrix} H \\ | \\ OH \end{matrix} = X.CO.N \begin{matrix} H \\ \\ OH \end{matrix} + N_2.$

Diese Hydroxamsäurester (Ib) und Hydroxamsäuren (IIb) können nun in ihrer tautomeren Form die bei den Oximen zuerst beobachtete Beckmannsche Umlagerung erleiden:

Ib) $\begin{matrix} X-C=O \\ | \\ C_2H_5O-N-H \end{matrix} \longleftrightarrow \begin{matrix} X-C-OH \\ \| \\ C_2H_5O-N \end{matrix} \rightarrow \begin{matrix} C_2H_5O-C-OH \\ \| \\ X-N \end{matrix}$

IIb) $\begin{matrix} X-C=O \\ | \\ HO-N-H \end{matrix} \longleftrightarrow \begin{matrix} X-C-OH \\ \| \\ HO-N \end{matrix} \rightarrow \begin{matrix} HO-C-OH \\ \| \\ X-N \end{matrix}$

Im ersteren Falle ist das Umlagerungsprodukt die tautomere Form des entstehenden Urethans:

Ic) $\begin{matrix} C_2H_5O-C-OH \\ \| \\ X-N \end{matrix} \longleftrightarrow \begin{matrix} C_2H_5O-C=O \\ | \\ X-NH \end{matrix}$

Im zweiten Falle werden die Umlagerungsprodukte sofort unter Wasserabspaltung in Alkylisocyanate übergehen, die ja bekanntlich mit Wasser in CO_2 und symmetrische Dialkylharnstoffe zerfallen.

IIc) $\begin{matrix} HO-C-OH \\ \| \\ X-N \end{matrix} \longleftrightarrow \begin{matrix} C=O \\ \| \\ X-N \end{matrix}$

IId) $2X.N:C:O + H_2O = (XNH)_2C:O + CO_2$

Diese beiden Reaktionen sind praktisch wichtig, weil die entstehenden Urethane und Dialkylharnstoffe beim Erhitzen mit Säuren oder mit Aetzkalk primäre Amine liefern. Man kann also auf diese Weise aus einem Säureester X.COOR über das Hydrazid und Azid das primäre Amin $X.NH_2$ darstellen (vgl. den Artikel „Ammoniakderivate" S. 273).

Aehnlich verläuft offenbar die Bildung acylierter Semicarbazide beim Kochen von Säureaziden mit Säurehydraziden. So liefert Benzazid mit Acethydrazid Acetylphenylsemicarbazid.

$$C_6H_5.CO.N \begin{matrix} N \\ \| \\ N \end{matrix} + \begin{matrix} H \\ | \\ NH.NH.CO.CH_3 \end{matrix}$$

$$\rightarrow N_2 + C_6H_5.CO.NH.NH.NH.CO.CH_3 \longleftrightarrow$$

$$\longleftrightarrow \begin{matrix} C_6H_5-C-OH \\ \| \\ CH_3.CO.NH.NH-N \end{matrix} \rightarrow$$

$$\begin{matrix} CH_3.CO.NH.NH-C-OH \\ \| \\ C_6H_5-N \end{matrix} \longleftrightarrow$$

$$\longleftrightarrow \begin{matrix} CH_3.CO.NH.NH-C=O \\ | \\ C_6H_5-NH \end{matrix}$$

5b) Verbindungen mit mehr als drei direkt zusammenhängenden Stickstoffatomen. Abgesehen von den in diesem Artikel nicht zu besprechenden heterozyklischen Verbindungen (vgl. S. 770) gehören hierher die schon besprochenen Disdiazoaminoverbindungen und das Disdiazobenzolamid (s. S. 758 und 759), die als Derivate des Stickstoffwasserstoffs H.N:N.NH.N:NH aufgefaßt werden können, der selbst nicht bekannt ist.

Außerdem kennt man noch Derivate dreier, ebenfalls unbekannter Stickstoffwasserstoffe von je vier direkt miteinander verbundenen Stickstoffatomen. Der erste derselben ist der hypothetische Stickstoffwasserstoff $H_2N.N:N.NH_2$, dessen Derivate man als Tetrazone bezeichnet. Man kennt aliphatische und aromatische Tetraalkyltetrazone $(Alk)_2N.N:N.N(Alk)_2$, die bei der Oxydation asymmetrischer Dialkylhydrazine mit Quecksilberoxyd in alkoholischer oder ätherischer Lösung oder mit verdünnten Eisenchloridlösung

$(Alk)_2N.NH_2 + H_2N.N(Alk)_2 + O_2 =$
$(Alk)_2.N.N:N.N(Alk)_2 + 2H_2O$

entstehen und anscheinend auch durch Einwirkung von Nitrohydroxylamin (vgl. den Artikel „Ammoniakderivate“ S. 269) auf sekundäre Amine erhalten werden können. Es sind wenig wichtige, ziemlich leicht zersetzliche, flüssige oder feste basische Körper.

Analog liefern Aldehydphenylhydrazone bei der Oxydation mit Quecksilberoxyd oder Amylnitrit die sogenannten Hydrotetrazone, die als Derivate des hypothetischen Stickstoffwasserstoffs $H_2N.NH.NH.NH_2$ zu betrachten sind. So erhält man aus Benzaldehydphenylhydrazon das sogenannte Dibenzaldiphenyldihydrotetrazon.

$$\begin{matrix} C_6H_5.CH:N.NHC_6H_5 \\ C_6H_5.CH:N.NHC_6H_5 \end{matrix} + O = \begin{matrix} C_6H_5.CH:N.N.C_6H_5 \\ | \\ C_6H_5.CH:N.N.C_6H_5 \end{matrix} + H_2O.$$

Diese Hydrotetrazone lösen sich in konzentrierter Schwefelsäure mit intensiv blauer oder violetter Farbe und bedingen wahrscheinlich die sogenannte „Bülowsche Reaktion“ der Phenylhydrazone und symmetrischen Phenylhydrazide (vgl. den Artikel „Ammoniakderivate“ S. 305).

Schließlich kennt man noch Derivate eines ebenfalls unbekannten Stickstoffwasserstoffs $HN:N.NH.NH_2$, den man unter Anlehnung an den Namen Butylen als „Buzylen“ bezeichnet hat. Buzylenderivate erhält man durch Kuppelung von Diazoniumsalzen mit Alkyl- und Acylhydrazinen (vgl. S. 757). So entsteht Phenyläthylbuzylen aus Benzoldiazoniumsulfat und Aethylhydrazin,

$$C_6H_5.N_2.SO_4H + H_2N.NHC_2H_5 = C_6H_5.N:N.NH.NHC_2H_5 \text{ oder } C_6H_5.N:N.N(C_2H_5).NH_2 + H_2SO_4$$

und Hippurylphenylbuzylen aus Benzoldiazoniumsulfat und Hippursäurehydrazid.

$$C_6H_5.N_2.SO_4H + H_2N:NH.CO.CH_2.NH.CO.C_6H_5 = C_6H_5.N:N.NH.NH.CO.CH_2.NH.CO.C_6H_5 + H_2SO_4$$

Diphenylbuzylene, die man auch als Diazobenzolphenylhydrazide bezeichnet, entstehen enweder analog aus Benzoldiazoniumsulfat und Phenylhydrazin oder auch durch Oxydation von Phenylhydrazinen mit Jodlösung. Sie haben, wie die gleich noch zu erwähnende Oxydation wahrscheinlich macht, die Konstitution $C_6H_5.N:N.N(C_6H_5).NH_2$. Auch die Buzylenderivate sind ziemlich unbeständige, wenig wichtige Körper.

Schließlich kann man auch Ketten von acht direkt miteinander verbundenen Stickstoffatomen erhalten, und zwar Derivate eines unbekannten Stickstoffwasserstoffs $NH:N.NH.N:N.NH.N:NH$, die man Oktazone oder Bisdiazotetrazone nennt. Sie entstehen, wenn man die eben erwähnten Diazobenzolphenylhydrazide mit Kaliumpermanganat oxydiert. Die Oxydation verläuft analog derjenigen der asymmetrischen Dialkylhydrazine zu Tetrazonen. Das einfachste Diazobenzolphenylhydrazid liefert so ein Bisdiazobenzoldiphenyltetrazon oder Tetraphenyloktazon.

$$2C_6H_5.N:N.N(C_6H_5).NH_2 + O_2 = C_6H_5.N:N.N(C_6H_5).N:N.N(C_6H_5).N:N.C_6H_5 + 2H_2O.$$

Auch die Oktazone sind sehr leicht zersetzliche explosive Substanzen.

6. **Beschreibung wichtiger Diazo- und Azoverbindungen.**[1]) 1. Diazoverbindungen. Diazomethan $N_2:CH_2$. Azimethylen; gelbes. geruchloses, giftiges Gas; greift Haut, Augen und Lunge stark an.

Diazoessigsäure $N_2:CHCOOH$; sehr unbeständig; Na-Salz: gelb, sehr leicht löslich in H_2O; die Lösung reagiert stark alkalisch.

Diazoessigsäureaethylester $N_2:CHCOO.C_2H_5$. Fp. —24°; Sdp. 143°; d^{22} 1,073; explodiert heftig beim Zusammenbringen mit konz. H_2SO_4, nicht aber durch Stoß oder Schlag.

α-Diazopropionsäureäthylester $N_2:C(CH_3).COO.C_2H_5$. $Sdp._{41}$ 65 bis 68°; gelbes Oel.

* Diazobenzolchlorid $C_6H_5N_2Cl$ farblose Nadeln; Platinchloriddoppelsalz: gelbe Prismen; Quecksilberchloriddoppelsalz: weiße Nadeln, die sich bei 122° zersetzen.

* Diazobenzolbromid $C_6H_5N_2Br$; weiße Blättchen; Kupferbromürdoppelsalz: rotgelbe Nadeln. Diazobenzolperbromid $C_6H_5N_2Br_3$; gelbe Blättchen aus Alkohol; unlöslich in H_2O und Aether.

* Diazobenzolnitrat $C_6H_5N_2O.NO_2$; lange farblose Nadeln, die durch Stoß, Druck oder gelindes Erhitzen außerordentlich heftig explodieren.

* Diazobenzolsulfat $C_6H_5N_2O.SO_3H$ farblose, prismatische Nadeln, die bei 100° explodieren.

* Diazobenzolrhodanid $C_6H_5N_2.SCN$; gelbe, sehr explosive Masse.

Diazobenzolanhydrid $(C_6H_5N_2)_2O$; aus Diazobenzolkalium und Säure; gelbe, äußerst explosive Fällung.

Diazobenzolkalium $C_6H_5N_2OK$; weiche, perlmutterglänzende Blättchen.

Diazobenzolmethyläther $C_6H_5N_2OCH_3$; gelbes, flüchtiges, betäubend riechendes, zersetzliches Oel.

Diazobenzolsulfosäure $C_6H_5N_2SO_3H$, Benzolazosulfosäure; sehr leicht zersetzlich; K-Salz: gelbe bis orangefarbige zersetzliche Kristalle, die stark lichtempfindlich sind und in Mischung mit Aminen und Phenolen zu einer photographischen Kopiermethode („Diazotypie“) verwendet werden, wobei Azofarbstoffe entstehen.

Diazobenzolcyanid $C_6H_5N_2CN$; unbeständiges Oel; HCN-Doppelverbindung: gelber Niederschlag, Fp. 70°.

2. Diazoaminoverbindungen. Diazoaminomethan $CH_3N_2.NHCH_3$. Fp. —12°; Sdp.

[1]) Bearbeitet von K. Schaum. Ueber die Konstitution der mit * bezeichneten Diazoniumsalze vgl. S. 751ff.

93°; farblose, giftige Flüssigkeit, die beim Ueberhitzen heftig explodiert; mit H_2O mischbar; Ag-Salz: farblose Nadeln; Cu-Salz: gelbe Kristalle.

Diazoaminobenzol $C_6H_5N_2.NHC_6H_5$; Benzoldiazoanilid, Diazobenzolanilid; schmilzt bei 96° und explodiert beim Erhitzen auf höhere Temperatur; goldgelbe glänzende Blättchen oder Prismen; unlöslich in H_2O; schwer löslich in kaltem Alkohol, leicht löslich in heißem Alkohol, Aether, Benzol. Platinchlorwasserstoffsäure-Doppelsalz: rötliche Nadeln.

3. Azoverbindungen. Azomethan $CH_3.N_2.CH_3$; beim Erhitzen heftig explodierendes Gas.

Azodicarbonsäure $COOH.N_2.COOH$; Azoameisensäure; K-Salz: gelbe Nädelchen, die sich über 100° unter Verpuffung zersetzen. Diäthylester: $Sdp._{13}$ 106°; orangegelbes Oel.

Azodicarbonamid $NH_2CO.N_2.CONH_2$, Azoformamid; orangerotes Pulver.

Azodicarbondiamidin $NH_2(NH)C.N_2.C.(NH)NH_2$; das Nitrat bildet ein gelbes, schwer lösliches, bei 180 bis 184° verpuffendes Kristallpulver.

Azobenzol $C_6H_5.N_2.C_6H_5$, Azobenzid; Fp. 68°; Sdp. 293°; orangerote rhombische Kristalle; schwer löslich in H_2O, leicht löslich in Alkohol und Aether.

Azotoluole $(CH_3)C_6H_4.N_2.C_6H_4(CH_3)$; o-: Fp. 157°; m-: Fp. 55°; p-: Fp. 143°.

Benzolazomethan $C_6H_5.N_2.CH_3$; Sdp. ca. 150°, und Benzolazoaethan $C_6H_5.N_2.C_2H_5$; Sdp. ca. 180°, sind eigentümlich riechende Flüssigkeiten.

4. Aminoazoverbindungen. p-Aminoazobenzol $C_6H_5.N_2.C_6H_4NH_2$; gelbe Blättchen oder Nadeln; Fp. 123°, Sdp. 360°; $Sdp._{12}$ 225°. Chlorhydrat: stahlblaue Nadeln. Die Mono- und Disulfosäure bilden den Farbstoff Echt- oder Säuregelb. p-Aminoazobenzol ist das Ausgangsprodukt für viele Disazofarbstoffe und Induline. 2,4-Diaminoazobenzol $C_6H_5.N_2.C_6H_3(NH_2)_2$; gelbe Nädelchen, Fp. 117°. Sein HCl-Salz ist der Farbstoff Chrysoidin. Triaminoazobenzol $NH_2.C_6H_4.N_2.C_6H_3(NH_2)_2$; das HCl-Salz ist im Bismarckbraun (Vesuvin) enthalten.

Ueber Disazoverbindungen usw. vgl. den Artikel „Farbstoffe".

5. Azoxyverbindungen. Azoxybenzol $C_6H_5.N\overset{O}{—}N.C_6H_5$; Fp. 36°; hellgelbe Nadeln; unlöslich in H_2O; leicht löslich in Alkohol und Aether.

p-Azoxyanisol $(CH_3O)C_6H_4.N\overset{O}{—}N.C_6H_4(OCH_3)$.

p-Azoxyphenetol $(C_2H_5O)C_6H_4.N\overset{O}{—}N.C_6H_4(OC_2H_5)$, und ähnlich konstituierte Verbindungen bilden kristallinisch-flüssige Modifikationen (vgl. oben und den Artikel „Flüssige Kristalle").

6. Stickstoffwasserstoffsäurederivate. Methylazid $CH_3.N_3$, Methyldiazoimid, giftige Flüssigkeit; Sdp. etwa 20°; d_{15}^{8} 0,869; der Dampf explodiert bei starkem Erhitzen.

Azidoessigsäure N_3CH_2COOH; Aethylester: farbloses Oel, $Sdp._{21}$ 75°.

Azidokohlensäure N_3COOH; Methylester: Sdp. 102°; Amid: Fp. 97°.

Propionylazid $CH_3CH_2CO.N_3$; farblose, stechend riechende Flüssigkeit.

Carbodiazid $CO(N_3)_2$; spießige Kristalle von betäubendem Geruch; explosiv.

Diazobenzolimid $C_6H_5N_3$, Stickstoffwasserstoffsäurephenylester: Sdp_{12} 59°; gelbes, betäubend riechendes Oel, das unter gewöhnlichem Druck erhitzt explodiert.

Literatur. ***V. v. Richter***, *Chemie der Kohlenstoffverbindungen, Bonn 1905 bis 1909.* — ***Meyer-Jacobson***, *Lehrbuch der organischen Chemie, Leipzig 1902 bis 1911.* — ***A. F. Holleman***, *Lehrbuch der organischen Chemie, Leipzig 1911.* — ***Th. Posner***, *Lehrbuch der synthetischen Methoden, Leipzig 1903.* — ***A. Hantzsch***, *Die Diazoverbindungen, Stuttgart 1903.* — ***J. Thiele***, *Ueber die Konstitution der aliphatischen Diazoverbindungen und der Stickstoffwassersäure. Berichte der deutschen chemischen Gesellschaft.* ***44.*** *2522 u. 3336 [1911].* — ***Angeli***, *Atti R. Accad. dei Lincei, Roma. [5]* ***16.*** *II. 790 [1908],* ***20.*** *I. 626 [1910].*

Th. Posner.

B.

Babinet

Jaques.

Geboren am 5. März 1794 zu Lurignan im Departement Vienne; gestorben am 21. Oktober 1872 zu Paris. Er wurde zunächst Artillerieoffizier, dann, nachdem er 1814 seinen Abschied genommen, Professor am Collège Saint-Louis und Hilfsastronom am Längenbureau. 1825 bis 1828 nahm er teil an einer meteorologischen Expedition nach Athen und wurde 1840 zum Mitglied der Pariser Akademie ernannt. Babinets Arbeiten beschäftigrn sich mit Optik, Magnetismus, Wärmetheorie; er konstruierte einen Kompensator zur Untersuchung zirkulär polarisierten Lichtes.

E. Drude.

Baco von Verulam

Francis.

Geboren am 26. Februar 1561 in London; gestorben am 9. April 1626 in Highgate bei London. Er war der Sohn des Großsiegelbewahrers von England, bezog mit 14 Jahren die Universität Cambridge, unternahm zur weiteren Ausbildung eine Reise nach Frankreich, von der er aber bald anläßlich des Todes seines Vaters 1580 zurückkehrte. Wenig vermögend wurde er des Gelderwerbes wegen Advokat, doch drängte sein Ehrgeiz nach anderen Stellungen. Als Kronanwalt arbeitete er die Anklageschrift gegen seinen bei der Königin Elisabeth in Ungnade fallenen Gönner, den Grafen Essex, aus und stellte 1601 sogar den Antrag zu dessen Hinrichtung. Nach dem Tode Elisabeths wendete Jakob I. ihm seine Gnade zu, ernannte ihn zum Peer, schließlich zum Großsiegelbewahrer und Großkanzler. 1621 wurde Baco der Bestechlichkeit als Kanzler des höchsten Gerichtshofes angeklagt und verurteilt. König Karl I. begnadigte ihn und setzte ihm eine Pension aus; doch starb Baco zwei Jahre darauf. Sein Charakter sowohl wie seine Bedeutung für die Wissenschaft erfahren sehr verschiedene Beurteilung; durch sein nachdrückliches Hinweisen auf die induktive Methode und energisches Experimentieren hat er sich um die Naturwissenschaft ein unbestreitbares Verdienst erworben.

Literatur. ***Kuno Fischer,*** *Franz B. v. V., Leipzig 1875.* — ***Abbott,*** *Francis B. v. V., London 1885.* — ***Rosenberger,*** *Gesch. d. Phys. II, S. 70 bis 85, Braunschweig 1884.*

E. Drude.

Baer

Karl Ernst von.

Geboren 17. (28.) Februar 1792 auf dem Gute Piep in Estland; gestorben 16. (28.) November 1876 in Dorpat. Er studierte von 1810 bis 1814 in Dorpat Medizin und promovierte auch daselbst. Darauf machte er dem Brauche der Zeit folgend eine Studienreise, die ihn nach Wien, Berlin und Königsberg führte, ohne daß ihn seine praktisch-medizinischen Studien gefesselt hätten. Als er dann im Herbst 1815 nach Würzburg kam, lernte er durch Döllinger das Feld der vergleichenden Anatomie und Embryologie kennen, das von nun an seine ganze wissenschaftliche Kraft in Anspruch nahm. Mit besonderer Genugtuung begrüßte es Baer, als er 1817 eine Prosektorstelle in Königsberg annehmen konnte, um so gänzlich die praktische Medizin verlassen zu können. Für ihn beginnt nun eine außerordentlich fruchtbare Tätigkeit als Forscher und Lehrer, die auch äußerlich durch seine schon 1819 erfolgte Ernennung zum außerordentlichen und 1821 zum ordentlichen Professor der Zoologie und 1826 zugleich zum Professor der Anatomie anerkannt wurde. Von anderen weniger umfangreichen anatomischen Studien wandte er sich bald der Entwickelungsgeschichte zu, wahrscheinlich angeregt durch die Arbeit Panders Die Entwickelung des Hühnchens, die er bei Döllinger hatte entstehen sehen. Seine entwickelungsgeschichtlichen Ergebnisse, die er in einer grundlegenden Monographie der Embryologie niederlegte (1828 bis 1837) waren so bedeutend, daß er als Bahnbrecher auf diesem damals neuen Gebiete bezeichnet werden muß. Nicht mit Unrecht hat man ihn den Vater der Entwickelungsgeschichte genannt. Eine seiner wichtigsten Entdeckungen ist die des menschlichen Eis, die ihm 1827 durch Zufall gelang. Im Jahre 1834 verließ er Königsberg aus nicht ganz aufgeklärten Gründen, vielleicht weil ihm die Ver-

hältnisse zu eng waren und nahm eine Stelle als außerordentliches Mitglied der Akademie der Wissenschaften in St. Petersburg an. Anfangs war dieser Wechsel für ihn sehr ungünstig, denn er konnte an keine Fortsetzung seiner in Königsberg begonnenen Arbeiten denken, da er nicht die nötigen Hilfsmittel zur Verfügung hatte. Mit jugendlicher Elastizität wandte er sich bald anderen Studienobjekten zu, so zuerst kraniologischen und anthropologischen Arbeiten, später auch linguistischen und geographischen, auf die hier indessen nicht eingegangen werden soll.

Im Auftrage der Regierung führte er eine Reihe von Reisen zur Erforschung des russischen Reiches aus, so nach der Insel Novaja Semelja, dem russischen Lappland, der Halbinsel Kola und kam 1845 auch nach Triest, um sich noch einmal entwickelungsgeschichtlichen Studien hinzugeben, jedoch befriedigten ihn die bei Erforschung der Entwickelung der Seesterne erzielten Ergebnisse nicht. Er wandte sich nunmehr ganz der angewandten Naturwissenschaft, besonders der Fischerei zu, machte zu diesem Zwecke noch eine Reihe von Reisen, deren Ergebnisse er in seinen Kaspischen Studien I bis VIII niederlegte. Diese Abhandlungen enthalten noch eine Reihe von wertvollen geographischen Befunden, die einen Beweis für die große Vielseitigkeit der Kenntnisse dieses Naturforschers geben. 1864 legte er seine arbeitsreichen Ämter nieder, um sein Leben in wohlverdienter Muse in Dorpat zu beschließen. v. Baer ist als einer der imposantesten deutschen Zoologen neben Johannes Müller anzusehen. Seine zahlreichen Arbeiten zeugen von seinem weiten Blick und einer sehr vorsichtigen Verwertung der Resultate, entsprechend seiner Devise „Beobachtung und Reflexion". Er war Anhänger der Cuvierschen Typenlehre, die er entwickelungsgeschichtlich weiter ausbaute. Dem biogenetischen Grundgesetz gegenüber hat er sich stets in vorsichtiger Reserve gehalten.

Von seinen Schriften seien nur erwähnt: De ovi mammalium et hominis genesi, Leipzig 1827; Ueber Entwickelungsgeschichte der Tiere, Beobachtung und Reflexion, Königsberg 1828 bis 1837, 2 Bde., Schlußheft herausgegeben von Stieda, Königsberg 1888; Untersuchungen über die Entwickelungsgeschichte der Fische. Nebst einem Anhang über die Schwimmblase, Leipzig 1835; Ueber doppelleibige Mißgeburten oder organische Verdoppelungen in Wirbeltieren, Petersburg 1846; Reden und kleine Aufsätze, Petersburg 1864 bis 1877, 3 Bde., 2. Ausg., Braunschweig 1886; Selbstbiographie, Nachrichten über Leben und Schriften, Petersburg 1886, 2. Ausgabe, Braunschweig 1886.

Literatur. ***Stieda,*** *Karl Ernst von Baer, Braunschweig 1878.* — ***Seidlitz,*** *Beiträge zur Deszendenztheorie II, Baer und die Darwinsche Theorie, Leipzig 1876.*

W. Harms.

Bakterien.

Morphologie.

1. Einleitung. 2. Größe. 3. Formen. 4. Formabweichungen. 5. Membran. 6. Protoplast. 7. Geißeln. 8. Teilung. 9. Wuchsformen. 10. Zooglöen und Kolonien. 11. Sporen. 12. Sporenkeimung. 13. System der Bakterien.

1. Einleitung. Die Bakterien sind sehr kleine, einzellige, mit fester Membran umhüllte Organismen ohne Chlorophyll und sehr wahrscheinlich ohne Zellkern, welche sich ausschließlich vegetativ vermehren und zwar durch Zweiteilung, die bei den gestreckten Formen stets senkrecht zur langen Achse verläuft. Sie stellen eine ziemlich isolierte Gruppe niederster pflanzenartiger Lebewesen dar, die aber verwandtschaftlich nicht vollständig geschlossen ist und z. T. nur durch das gemeinsame Merkmal außerordentlicher Kleinheit zusammengehalten wird. Für die echten Fadenbakterien (Trichobacteriaceen) kann mit so viel Grund ein enger Anschluß an die blaugrünen Algen angenommen werden, daß sie besser dort unterzubringen sind (s. Spaltplanzen).

2. Größe. Eine Stäbchenbakterie mittlerer Größe ist etwa 1 μ breit und 5 μ lang, docht gibt es wesentlich größere und kleinere Formen, wie die folgende Tabelle zeigt: Spirillum parvum 0,1—0,3 μ dick; Bacillus der Influenza 0,4 μ breit, 1,2 μ lang; Eiterkokken 0,8 μ; Milzbrandbazillus 1 bis 1,2 μ breit, 3 bis 10 μ lang; Bacillus megatherium 2,5 μ breit, 10 μ lang; Bac. oxalaticus 4 μ breit, 10 μ lang; Chromatium Okenii 5 μ breit. Die kleinsten Formen, wie z. B. Spirillum parvum passieren noch Porzellanfilter. Die Erreger der Maul- und Klauenseuche, sowie die der Hühnercholera und der Peripneumonie der Rinder sind mit gewöhnlichen Linsen überhaupt nicht sichtbar. Doch bilden die letzteren auf künstlichem Nährsubstrat sichtbare Kolonieen. Ob diese letzten Mikroben, sowie die gelegentlich mit dem Ultramikroskop beobachteten sogenannten Ultramikroben Bakterien sind, ist natürlich kaum entscheidbar.

3. Formen. Der Formenkreis der Bakterien ist sehr einfach. Wenn wir zunächst von abweichenden Gestalten absehen, so können wir drei Haupttypen der Form, nämlich die Kugel, das Stäbchen und die Schraube und demgemäß Kugel-, Stäbchen- und Schraubenbakterien unterscheiden. Die Grenze zwischen Kugelbakterien (Kokken) und Stäbchenbakterien ist oft nicht leicht zu ziehen. Unter den Schraubenbakterien werden diejenigen, welche nur ein kurzes Stück eines Schraubenumganges darstellen, die also, in die Fläche projiziert, kommaartig aussehen („Kommabacillus" der Cholera) als Vibrionen von den Spirillen unterschieden, deren Körper einen oder mehrere Schraubenumgänge umfaßt. Die Spirochäten, deren Körper sehr dünne und lange Spiralen mit vielen Windungen darstellen, scheiden aus

den Bakterien aus. Es sind wahrscheinlich flagellatenartige Mikroorganismen

Innerhalb der Grundformen kommen viele kleinere Besonderheiten vor, die zur Charakterisierung der Arten brauchbar sind. So ist z. B. der Diphtheriebacillus kein völlig zylindrisches Stäbchen, sondern hat häufig Keulen- oder Hantelform, andere Stäbchenbakterien, wie z. B. der Tuberkelbacillus sind nicht ganz gerade, sondern etwas gekrümmt, Rhabdomonas, eine Schwefelbakterie, hat eine unregelmäßig spindlige Form; auch Eiformen, die dann schwer von Kokken abzugrenzen sind, kommen vor. Verhältnis von Länge zur Breite, Steilheit der Schraubengänge, Beschaffenheit der Stäbchenenden (ob abgestutzt oder abgerundet usw.) geben weitere verwertbare Merkmale.

4. Formabweichungen. Außer solchen kleineren Abweichungen von den Grundtypen gibt es teils normal, teils unter bestimmten Bedingungen auftretende besondere Formen, die abnorm groß, aufgetrieben oder verzweigt sind. Man pflegt sie gewöhnlich als Involutionsformen zu bezeichnen. Es ist jedoch nicht sicher, ob sie wirklich überall Krüppel- oder Altersbildungen sind und nicht in manchen Fällen in den normalen Entwicklungsgang der Art hineingehören. So finden sich z. B. beim Tuberkelbacillus, wenn auch selten, so doch ganz normal in jungen Kulturen verzweigte Individuen; desgleichen beim Diphtheriebacillus. Noch viel ausgeprägter und ganz durchgehend verzweigt sich das merkwürdige Bacterium Berestnewi (Fig. 1a). Zweifelhaft ist es, ob die y-, t- oder v-Formen, welche der Knöllchenbacillus der Leguminosen in älteren Knöllchen zeigt (Fig. 1c), oder die riesigen, schlauchartigen oder blasigen Individuen etlicher Essigbakterienarten, welche besonders häufig bei höherem Essiggehalt und höherer Temperatur einzeln aber auch in jungen Kulturen angetroffen werden (Fig. 1b), wirklich Mißbildungen sind. Sicher sind die klumpigen, verzerrten Individuen, die in alten Kulturen bei vielen Bakterien ganz gewöhnlich vorkommen, durch die physikalischen und chemischen Bedingungen des Substrates hervorgerufene Degenerationsformen, die sich z. T. auch planmäßig züchten lassen.

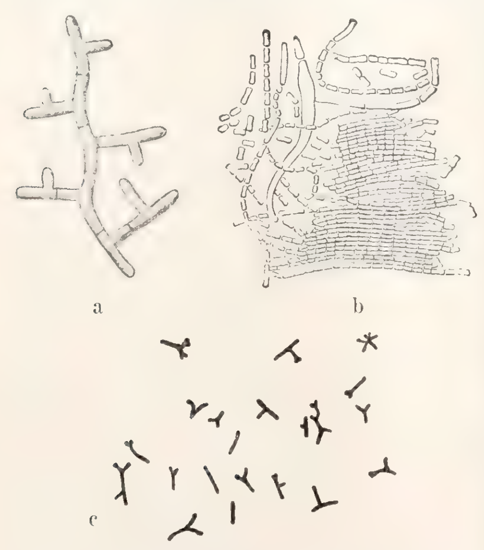


Fig. 1. Abweichende Bakterienformen. a) Bacterium Berestnewi. Nach Lepesikkin. Vergrößerung 2300. b) Bacterium aceti. Nach F. Chr. Hansen. Vergrößerung 1000. c) Bacillus radicicola aus dem Knöllchen von Vicia Faba. Vergrößerung 750.

5. Membran. Die Bakterien sind stets von einer festen Membran umkleidet, ändern also ihre Körperformen nicht.

Eine Ausnahme machen nur die Myxobakterien, doch ist diese Gruppe gerade wegen der Flexibilität der Individuen, sowie wegen anderer vom Bakterientypus auffällig abweichender Eigenschaften von den echten Bakterien abzutrennen und den Schleimpilzen zu nähern. Sie tauchen besonders leicht auf Kaninchenmist auf, der bei höherer Temperatur feucht gehalten wird und bilden zunächst Schwärme stäbchenförmiger, auf fester Unterlage kriechender (niemals frei schwimmender) biegsamer Individuen, die sich später bei der Sporenbildung, die hier einfach durch kugelförmige Abrundung der Stäbchen vor sich geht, zu kleinen, meist lebhaft gefärbten und oft gestielten Fruchtkörpern vereinigen.

Die Membran der Bakterien besteht nur in seltenen Fällen aus Zellulose, meist ist sie stickstoffhaltig wie die der Pilze. Sie ist stets sehr dünn und ohne wahrnehmbare Skulpturen. Bei manchen Bakterien läßt sich durch Plasmolyse der Zelleib von der Membran ablösen, so daß die Zellkammer deutlich hervortritt. Die äußere Membranschicht ist gewöhnlich etwas schleimig, weshalb im lebenden Präparat die Individuen bei dichter Lagerung etwas voneinander entfernt liegen. Auch die häufige Verklebung zu kleineren oder größeren Gruppen hat dieselbe Ursache. Gelegentlich erreichen die Schleimhüllen besondere Ausbildung und bedeutende Mächtigkeit und werden dann als Kapseln bezeichnet (Fig. 2). Sie lassen sich durch bestimmte Färbemethoden färben, sind aber auch direkt als helle Höfe zu sehen, wenn die lebenden Bakterien in sehr feiner Tusche aufgeschwemmt werden. Die Gallerthülle erreicht bei einzelnen durch starkes Schleimbildungsvermögen ausgezeichneten Formen bedeutende Dicke, so bei den Zuckerlösungen in Gallertmassen umwandelnden Froschlaichpilz (Streptococcus

mesenteroides), bei der Ginger-beer-plant (Bacterium vermiforme Fig. 2b), an deren gallertumhüllten und deshalb wurmförmigen Fäden die Gallertbildung oft einseitig gesteigert wird, so daß stielförmige Anhängsel entstehen. Noch ausgeprägter ist dies bei Bacterium pediculatum der Fall, dessen Individuen seitlich auf langen durcheinandergewirrten Gallertfäden sitzen. Bei manchen Bakterien zerfließen die Gallerthüllen vollständig und vereinigen sich zu zusammenhängenden Schleimmassen, in welche die Individuen eingebettet sind und die man als Zooglöen bezeichnet. Der

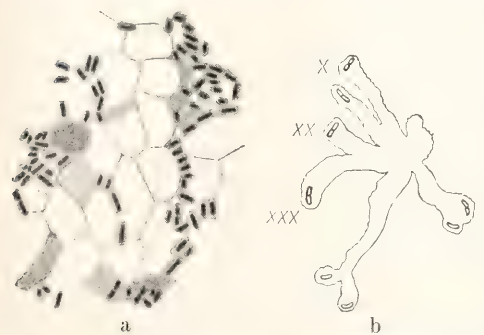


Fig. 2. a) Kapselbacillus der Pneumonie im Gewebssaft einer Maus. Vergrößerung 2000. b) Bacterium vermiforme. Nach Ward. Vergrößerung 420.

Schleim ist teils stickstoffhaltig teils stickstofffrei. Bei der Essigsäurebakterie Bact. Pasteurianum färbt sich die Gallerthülle mit Jod blau, besteht also aus einer Art Kohlehydrat.

6. Protoplast. Ueber die Organisation des Bakterienprotoplasten sind sehr widersprechende Ansichten geäußert worden, man kann aber wohl auf Grund der Tatsache, daß sich viele Bakterien ganz in der Weise pflanzlicher Zellen plasmolysieren lassen, annehmen, daß der Bau der Bakterienzelle im wesentlichen demjenigen der Pflanzenzelle entspricht. Allerdings sind nicht alle Bakterien plasmolysierbar, wie der Milzbrand-, Heu-, Kartoffelbazillus u. a., doch wird man im Hinblick auf die sehr gut plasmolysierbaren Vibrionen, Spirillen, Coli-, Typhus- und fluoreszenten Bakterien die Abweichungen auf besondere osmotische Eigenschaften dieser Formen und nicht auf prinzipiell andere Bauart ihrer Protoplasten zurückführen dürfen, zumal es auch nicht plasmolysierbare Pflanzenzellen gibt. Wie man an besondere großen Spirillen und Stäbchenbakterien direkt sehen kann, ist der lebende Inhalt der Bakterienzelle ein von Zellsafträumen durchsetzter Plasmaschlauch (Fig. 3, c—f). Andere Bakterien freilich, besonders junge, eben erst ausgekeimte Individuen haben ein vollkommen homogenes Plasma ohne Vakuolen, in dem auch anfänglich keinerlei körnige Bestandteile sichtbar sind.

Später finden sich ganz allgemein im Plasma verschiedenartige kleine Körnchen. Man hat ihnen besondere Aufmerksamkeit zugewandt bei der Frage, ob die Bakterien Zellkerne besitzen oder nicht. Die Kleinheit der Bakterien macht die Entscheidung sehr schwierig, so daß sie ohne Widerspruch bisher nicht erfolgt ist. So viel geht aber aus den zahlreichen Untersuchungen hervor, daß Kerne, wie sie den höheren Organismen zukommen, den Bakterien abgehen. Man hat zwar bei der Sporenbildung des Bacillus asterosporus und in der Spore selbst konstant ein Körnchen beobachtet, doch war es in den vegetativen Stäbchen nicht nachweisbar. Bei anderen Bakterien soll stets ein Kern vorkommen, dessen Teilungsstadiem sogar beschrieben werden; doch sind die Angaben nicht unbestritten und scheinen oft auf einer Verwechslung mit der während der Teilung auftretenden medianen Plasmaansammlung zu beruhen. Für wieder andere Bakterien werden mehrere Kerne angegeben. Bei einigen der größten und am besten untersuchten Arten sind im Plasma eine größere Zahl kleiner Körnchen nachgewiesen, welche ebenso wie die oben erwähnten „Kerne" aus nukleinartiger, d. h. also der für den Zellkern charakteristischen Substanz bestehen (Fig. 3). Sehr merkwürdig

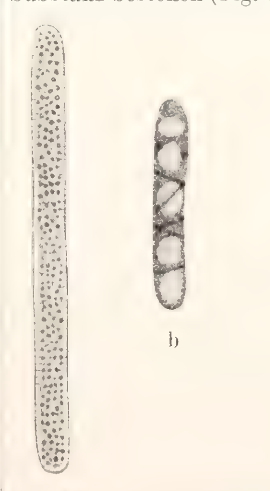




Fig. 3. Plasmastruktur und Körnchen. a Bacillus Bütschlii. Nach Schaudinn. b Bacillus maximus buccalis. Nach Swellengrebel. c Typhusbacillus. d Choleravibrio. e Milzbrandbacillus. f Spirillum undula. c bis f nach A. Fischer. Vergrößerung a 1000, b 2500, c bis e 2250, f 1500.

ist es, daß bei einem großen Spirillum und einer im Zahnbelag häufigen, großen Stäbchenbakterie (dem sogenannten Bacillus maximus buccalis (Fig. 3b) diese als Chroma-

tinkörnchen bezeichneten Granulationen, durch feine Fäden verbunden, eine spiralige Verteilung zeigen und daß sich die Körnchenspirale verdoppeln und beide Teile sich auseinanderziehen können. Man faßt diese Erscheinung als Teilungsvorgang auf. Bei dem sehr großen im Darm einer Schabe gefundenen Bacillus Bütschlii liegen die zahlreichen Körnchen in den Knoten eines sehr feinen Maschenwerkes (Fig. 3a). Während bei den obigen Formen die Zahl groß und unbestimmt ist, werden für Bacterium binucleatum nur zwei Körner angegeben, welche sich vor der Teilung in bestimmter Weise verändern und dann verdoppeln. Bei der großen kugeligen, beweglichen, marinen Schwefelbakterie Thiophysa ist die Teilung von Chromatinkörnchen sogar im Leben beobachtet worden. Ob die Granulationen als diffus verteilte Kernmasse oder, besonders da, wo ihre Zahl konstant und nicht groß ist, als Kerne selber zu deuten sind, oder überhaupt nicht mit der Kernfrage in Beziehung stehen, darüber herrscht keine Uebereinstimmung. Möglicherweise verhalten sich auch nicht alle Bakterien gleichartig.

Außer den Chromatinkörnchen finden sich im Plasma noch andere körnige Bestandteile, so z. B. das sogenannte Volutin, das in Spirillum volutans zuerst entdeckt, auch sonst verbreitet ist, ferner Fetttröpfchen. Im Plasma der wichtigsten Buttersäurebakterie Clostridum amylobacter treten in gewissen Entwicklungsstadien dichte Massen einer feinkörnigen Substanz auf, welche sich mit Jod blau färbt, also stärkeähnlich ist: sie wird als Granulose bezeichnet. Auch Glykogen ist bei Bakterien ebenso häufig als bei den höheren Pilzen verbreitet. Man kann alle diese Substanzen als Reservestoffe bezeichnen. Auch den Schwefel, der sich in dem Plasma der Schwefelbakterien in der Form dunkel erscheinender, zähflüssiger Tröpfchen findet. Er verschwindet allmählich, wenn die Schwefelbakterien in schwefelwasserstofffreiem Wasser gehalten werden, wird also verbraucht. Die Analyse der Tuberkelbazillen hat eine große Menge Wachs ergeben, doch ist das wohl ein Ausscheidungsprodukt, durch das auch die eigentümliche fettige, wachsartige Beschaffenheit der Kolonien resp. Kahmhäute bedingt wird.

Irgendwelche den Chromatophoren der grünen Pflanzen vergleichbare Farbstoffträger fehlen bei den Bakterien vollständig. Die rote Färbung, welche das große Chromatium Okenii, eine Schwefelbakterie, besitzt, scheint ganz diffus den Körper zu durchdringen.

Erwähnenswert ist noch, daß vor der Sporenbildung im Plasma des großen Bacillus Bütschlii eine nach den Enden zu verlaufende und hier springbrunnenartig umbiegende Plasmaströmung auftritt.

7. **Geißeln.** Viele Bakterien vermögen mit Hilfe besonderer Bewegungsorgane, der Geißeln, im Wasser zu schwimmen. Die Art der Fortbewegung ist verschieden. Manche Bakterien schießen pfeilschnell durchs Wasser, andere tanzen hin und her oder wackeln träge, manche beschreiben mit dem Vorder- und Hinterende Kegelmäntel, andere überschlagen sich beständig über die Querachse. Sehr verbreitet ist eine mit dem Vorwärtseilen verbundene Drehung um die Längsachse, die Individuen schrauben sich durch das Wasser, und zwar ist dies nicht nur bei den Vibrionen und Spirillen, sondern auch bei vielen Stäbchen deutlich zu beobachten. Im Leben ist nur bei den größten Spirillen die Begeißlung wahrnehmbar, doch läßt sie sich ganz allgemein durch besondere Färbungen (z. T. auch mit der Dunkelfeldbeleuchtung) sichtbar machen. Man sieht dann, daß die Geißeln sehr feine, gewellte Fäden verschiedener Länge darstellen, die wahrscheinlich als zarte, aus Löchern der Membran austretende Plasmafortsätze, weniger als Anhängsel der Membran aufzufassen sind. (Fig. 4). Nicht alle Bakterien besitzen Geißeln. Beweglich sind die Vibrionen und Spirillen, dann der Heu-, Kartoffel-, Coli-, Typhus-, Buttersäure-, Tetanusbacillus, die fluoreszenten Bakterien usw., während z. B. die typischen Essigbakterien, der Tuberkel-, Milzbrand-, Diphtheriebazillus sowie die meisten Kokken und Sarcinen nicht schwimmen können. Trotzdem es bei manchen bis dahin als unbeweglich geltenden Arten durch zweckmäßige Züchtung gelang, sie zum Schwimmen zu bringen und dementsprechend auch Geißeln nachweisbar

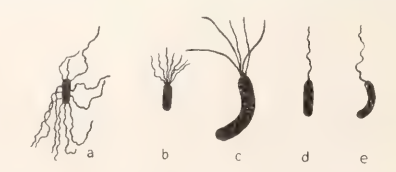


Fig. 4. Typen der Begeißlung. a peritrich; b und c lophotrich; d und e monotrich.

wurden, gibt es doch ohne Zweifel viele andere, bei denen nie Beweglichkeit festgestellt wurde.

Desgleichen ist die Anordnung der Geißeln, soweit man weiß, sehr konstant (vgl. Fig. 4). Im einfachsten Fall ist nur eine Geißel vorhanden und diese ist polar befestigt. Zu diesen als monotrich bezeichneten Bakterien gehören die Vibrionen, sowie eine Anzahl Stäbchenbakterien, wie

z. B. der Erreger des blaugrünen Eiters. Die lophotrichen Bakterien besitzen einen ebenfalls polar inserierten Schopf von Geißeln. Lophotrich sind die Spirillen sowie einige Stäbchenbakterien, wie der fluoreszierende Bacillus, der Bacillus der blauen Milch u. a. Spirillum undula, eins der häufigsten Sumpfwasserspirillen, besitzt z. B. 20 bis 30 Geißeln an einem Ende, die jedoch im Präparat meist mehr oder weniger miteinander verklebt sind, oft einen dickeren Schwanz bilden. Schließlich können die Geißeln über die ganze Körperoberfläche verteilt sein, wie es bei den meisten beweglichen Stäbchenbakterien der Fall ist. Solche Formen heißen peritrich. Die Zahl der Geißeln ist verschieden. Bei dem roten Hostienbacillus sind es nur 3 bis 9, beim Colibacillus etwa 10 bis 12, während der Bacillus proteus, eine sehr gewöhnliche Fäulnisbakterie, der Erreger des Rauschbrandes u. a. von einem dichten Pelz langer gewellter Geißeln bedeckt sind. Junge Individuen der mono- und lophotrichen Arten tragen nur an einem Körperende Geißeln; teilen sie sich jedoch, so sprossen auch am anderen Ende welche hervor, so daß bei längerem Vereintbleiben der Tochterzellen zweipolig begeißelte Formen vorzuliegen scheinen. Bei den peritrichen Arten müssen bei dem Wachstum vor und nach der Teilung neue Geißeln zwischen die alten eingeschoben werden. Die Bakteriengeißeln sind sehr empfindlich und werden leicht abgeworfen. Normal bewegliche und begeißelte Individuen trifft man deswegen nur in jungen Kulturen auf günstigem Substrat an (auf Agar oder in Flüssigkeiten). Oft geht bei lange dauernder Züchtung unter ungünstigen Bedingungen die Beweglichkeit verloren, wie sie sich andererseits durch besondere Kulturmethoden wieder erwecken läßt. Ganz normal verschwindet bei manchen Arten die Begeißelung in bestimmten Entwickelungstadien. Wenn z. B. der den Heuinfus während der ersten Tage durchschwärmende Heubacillus sich anschickt, an der Oberfläche der Flüssigkeit eine Kahmhaut zu bilden und weiterhin zur Sporenbildung überzugehen, so verliert er seine Geißeln und wird unbeweglich. Doch ist dieser Verlust nicht überall an die Sporenbildung geknüpft. Buttersäurebakterien und andere sporenbildende Anaerobe z. B. bleiben mit der Spore in ihrem Körper noch lange beweglich. Die aus den Sporen austretenden Keimstäbchen sind zunächst noch unbegeißelt, werden aber dann sehr rasch beweglich. Eigentümliche Gebilde sind die Geißelzöpfe, wie sie besonders typisch in Agarkulturen des Rauschbrandbacillus angetroffen werden. Es sind große spindelige Körper, welche aus zusammengedrehten, isolierten Geißeln bestehen. Wahrscheinlich kommen sie dadurch zustande, daß in dichten Kulturen einzelne Individuen mit ihren Geißeln verkleben, und nachdem diese losgerissen sind, immer neue an diesen Anfängen kleben bleiben und ihre Geißeln im Stiche lassen müssen. Dadurch und vielleicht durch Zuziehung der abgeworfenen Geißeln, die mit dem hin und her gewälzten Zopf in Berührung kommen, wächst dieser allmählich heran.

8. **Teilung.** Nach einer Periode des Wachstums der Bakterienzelle tritt Zweiteilung ein. Sie erfolgt bei den gestreckten Formen ausnahmslos senkrecht zur Längsachse, in deutlichem Gegensatz zu den sich vorwiegend längsteilenden Flagellaten. Grob betrachtet, erscheint die Teilung als eine Durchschnürung in der Mitte des Körpers, die schließlich zu einer Trennung beider Abkömmlinge führt. Bei den größten Formen ist der Vorgang etwas genauer verfolgt worden. Wenn das junge, noch von ganz homogenem Plasma erfüllte Stäbchen von Bacillus oxalaticus etwas in die Länge gewachsen ist, taucht in der Mitte eine Vakuole auf, welche bald von einer queren Plasmalamelle durchsetzt wird. Dann dringt von der Wand her eine ringförmige Leiste vor, die sich schließlich zu einer zarten Scheidewand entwickelt. Diese spaltet auf, die Enden der Tochterstäbchen runden sich ab, die Verbindungszone wird dadurch immer schmäler, bis sich beide Individuen gänzlich voneinander getrennt haben. Während dieser Zeit sind sie schon gewachsen und haben ihrerseits Teilungen eingeleitet, so daß manche der langen, äußerlich einheitlichen Stäbchen, die man vielfach antrifft, in Wahrheit Zellketten sind, deren Glieder sich in verschiedenen Stadien ihrer Loslösung befinden. Die Kokken zeigen meistens vor der Teilung keine Längsstreckung, vielmehr tritt die Scheidewand schon auf, wenn die Mutterzelle noch vollkommen kugelig ist. Die Halbkugeln runden sich dann später zu Kugeln ab.

Die Geschwindigkeit der Teilungsfolge richtet sich naturgemäß nach der Temperatur, Nahrung, Feuchtigkeit, ist aber auch bei günstigen Bedingungen bei den Arten spezifisch verschieden. Die Choleravibrionen z. B. teilen sich alle 20 Minuten, während der Tuberkelbacillus, dessen Trägwüchsigkeit sich auch in den sehr langsam wachsenden Kolonien zeigt, viele Stunden dazu gebraucht.

9. **Wuchsformen.** Die Lagerung der Tochterindividuen nach der Teilung ist für manche Arten sehr bezeichnend. Was zunächst die Stäbchen anlangt, so trennen sie sich nach der Teilung rascher oder langsamer oder aber sie bleiben lange aneinander kleben. Im ersten Falle entstehen Einzel-

individuen oder kurze Zellreihen, deren Glieder sich noch nicht ganz losgelöst haben, wie dies z. B. bei dem Heubacillus im Jugendstadium, beim Coli-, Typhusbacillus, den fluoreszenten Arten u. a. der Fall ist. Im zweiten Falle bilden sich lange Zellketten aus, die aber leicht auseinander fallen können. Solchen typischen Fadenwuchs zeigen z. B. der Heubacillus in der Kahmhaut (Fig. 5), der Milzbrandbacillus, der Bacillus mycoides (eine im Erdboden sehr verbreitete Art), die kahmhautbildenden Essigbakterien usw.



Fig. 5. Heubacillus (Bacillus subtilis), Stück einer Kahmhaut. Vergrößerung 100. Nach Migula.

Eigenartig ist die Wuchsart des Tuberkelbacillus und seiner Verwandten. Die dünnen, meist unregelmäßigen Stäbchen schieben sich nach der Teilung, der eine bajonettartige Deformation vorausgeht, unter plastischer Veränderung ihrer Form aneinander vorbei und bilden so die bekannten dicht verklebten Massen (Fig. 6).

Bleiben die Kugelbakterien nach der Teilung aneinander hängen, so kommt in

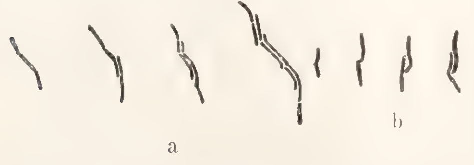


Fig. 6. Aufeinanderfolgende Stadien der Zellteilung und Koloniebildung. a vom Tuberkelbacillus. b vom Harnbacillus. Vergrößerung etwa 750.

den resultierenden Wuchsformen eine bei den Arten verschiedene Folge der Teilungsrichtungen zum Ausdruck, die systematisch verwertbar ist. Verlaufen die Teilungen ohne gesetzmäßige Folge nach allen Richtungen des Raumes, so entstehen unregelmäßige Zellhaufen (früher Staphylokokken genannt). Doch wird angegeben, daß auch solche Kokken sich gesetzmäßig nach den zwei Richtungen der Ebene teilen und so Viererformen und kleine Täfelchen bilden, die aber leicht auseinanderfallen und sich nur bei gewissen Arten erhalten. Diese werden dann als Pediokokken bezeichnet (Fig. 7a), während die übrigen sich gesetzlos teilenden (oder doch in ihrer späteren Anordnung keine bestimmte Lagerung zeigenden) Arten als Mikrokokken zusammengefaßt werden.

Teilen sich die Kokken alle in derselben Richtung, so muß eine Kette von Kokken entstehen. Man nennt diese Formen Streptokokken. Wechseln die Teilungen regelmäßig nach allen drei Richtungen des Raumes ab, so kommen würfelförmige, an umschnürte Warenballen erinnernde Gebilde zustande. Solche Kokken heißen Sarcinen (Fig. 7b). Bei allen Kokken finden sich gelegentlich Doppelkokken, nämlich dann, wenn einzeln liegende Individuen sich eben geteilt haben. Gehen Teilung und Trennung sehr langsam vor sich, so trifft man besonders häufig solche Doppelkokken an, wie z. B. bei dem Erreger der Gonorrhöe. Doch ist der Gattungsname Diplococcus dadurch nicht gerechtfertigt. Auch Vibrionen und Spirillen können gelegentlich nach den Teilungen aneinanderhängen bleiben, so daß dadurch längere oder kürzere Spiralen entstehen.

10. Zooglöen und Kolonien. Wenn die Bakterien in dichten Massen zusammen-

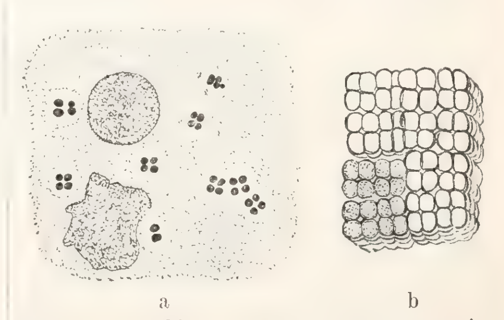


Fig. 7. a Pediococcus tetragenus, im Gewebssaft einer Maus. Nach Migula. Vergrößerung 1000. b Sarcina ventriculi. Nach Zopf.

gelagert sind, kommen häufig noch besondere Eigentümlichkeiten zum Ausdruck, die gute Merkmale zur Charakterisierung mancher Arten geben können. Man kann alle dichten Bakterienaggregationen als Zooglöen bezeichnen. Zum kleinen Teil lassen sie sich schon an den natürlichen Standorten beobachten, doch gehören im weiteren Sinne auch die Zusammenhäufungen hierher, welche die Bakterien bei künstlicher Kultur zeigen, insbesondere die Kolonien auf der Agar resp. Gelatineplatte. Eine natürliche Zooglöa, die früher Zoogloea ramigera (Fig. 8) hieß, trifft man z. B. oft in faulendem Wasser an. Es sind bandförmige, gelappte, meist regelmäßig gabelig verzweigte und dadurch etwas an die Braunalge Dictyota erinnernde Gebilde aus gallertiger Grundmasse, in welche die Stäbchenbakterien eingebettet sind. Die ganze Masse wächst an den Enden,

wo die Individuen besonders dicht gelagert sind, fort. Auf der Oberfläche von Birnenmost sind merkwürdige Zooglöen beobachtet, welche kugelige, mit fester Membran umhüllte und von Bakterien erfüllte Blasen darstellen. Sehr gewöhnlich sind Kahmhäute, welche auf Flüssigkeiten auftreten. Sie zeigen ihre Eigenheiten am besten in Reinkulturen. Das graue, dünne, trocken aussehende, an den Wänden des Gefäßes emporsteigende Häutchen, welches die Essigbakterien auf alkoholischen Flüssigkeiten bilden, sieht anders



Fig. 8. Verzweigte Zooglöe aus Sumpfwasser. Vergrößerung 170.

aus als die mehr schleimige, etwas gerunzelte Kahmhaut des Heubacillus, und dieser wieder unterscheidet sich auffällig von dem langsam wachsenden, fettigen Häutchen des Tuberkelbacillus, welches im Zentrum schollig-krümelig oder gefaltet, an dem Umfange schleierig-dünn und arabeskenartig gezeichnet ist. Die schleimige, wattenartige Kahmhaut des stickstoffbindenden Azotobacter bietet wieder ein anderes Aussehen usw. Andererseits bilden viele Bakterien, wie z. B. der Colibacillus niemals eigentliche Kahmhäute, sondern trüben nur die Flüssigkeit, während andere wieder nur einen Bodensatz in der klaren Flüssigkeit hervorrufen. Sehr typische Form und Struktur besitzen oft die Kolonien auf festem Substrat. So wächst z. B. der Kartoffelbacillus (Bacillus mesentericus) auf Kartoffelscheiben in sehr charakteristischen, wulstig oder leistenförmig gefalteten, oft gittrig und gekröseartig aussehenden, zähschleimigen Ueberzügen (Fig. 9). Die Kolonien auf Agar oder Gelatine haben nach Größe, Dicke, Umriß, Konsistenz, Glanz, Zeichnung, Oberfläche sehr verschiedenartiges Aussehen. Der Rand der Kolonie ist scharf oder verschiedenartig gefranst oder lockig, der Umriß rund oder zackig oder ausgebuchtet. Diese Kolonie ist dünnschleierig, die andere erhaben-knopfförmig.

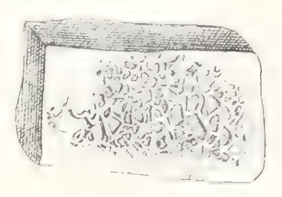


Fig. 9. Kartoffelstück von Bacillus mesentericus bewachsen. Natürliche Größe. Nach Lehmann und Neumann.

Die Oberfläche ist glatt, glänzend oder trocken schilfrig, hier wulstig, dort gebirgsartig oder geadert; die Struktur homogen, fein oder grobkörnig oder maulbeerartig oder strahlig. Die Fäulnisbakterie Bacillus proteus bildet spinnewebartige von Knötchen durchsetzte Kolonien, Bacillus mycoïdes wurzelartig verzweigte an Pilzmycelien erinnernde Komplexe. Die Milzbrandkolonien zeigen eine sehr regelmäßige Anordnung welliger, paralleler Fäden, welche sich am Rande in lockenartigen Strähnen loslösen (Fig. 10). Wenn auch die Koloniebilder von den Kulturbedingungen und der Beschaffenheit des Substrates abhängen und nur in den seltensten Fällen streng spezifisch sind, so liefern sie doch mit anderen Merkmalen zu-



Fig. 10. Junge Kolonie des Milzbrandbazillus. Vergrößerung 80. Nach Flügge.

sammen einen schätzbaren Anhalt bei der Bestimmung und Kennzeichnung der Arten. Auch die Wachstumsweise im Stichkanal der Kulturröhrchen ist verwertbar und vor allem das physiologische, aber leicht sichtbare Merkmal der Gelatineverflüssigung.

Heubacillus, viele Vibrionen, der grüngelblich fluoreszierende Wasserbacillus verflüssigen z. B. die Gelatine energisch, der Milzbrandbacillus viel langsamer, andere wie der Colibacillus überhaupt nicht.

Bei dem dichten Wachstum tritt schließlich noch eine neue, am Einzelindividuum nicht sichtbare Eigenschaft hervor, nämlich die Farbe. Abgesehen von den Purpurbakterien, deren rote Färbung im Innern der Zellen ihren Sitz hat, und dem Bacillus violaceus, dessen blauschwarze Färbung in der Zellwand steckt, sind die Farben der übrigen Farbstoffbakterien Ausscheidungsprodukte. Sie sind teils im Wasser löslich und diffundieren dann in das Kultursubstrat, wie bei den fluoreszenten Formen, teils unlöslich. Die besonders häufig vorkommenden roten, gelben und braunen Farbstoffe gehören meist zu den Lipochromen (Fettfarbstoffen). Man erhält leicht eine bunte Musterkarte farbiger Kolonien, wenn man Platten der Luftinfektion aussetzt. Besonders zahlreich sind gefärbte Kokken und Sarcinen. Grüne Farbstoffe fehlen (von zweifelhaften Ausnahmen abgesehen); doch enthalten die Purpurbakterien neben dem roten Farbstoff, dem Bakteriopurpurin auch einen grünen (das Bakteriochlorin).

11. Sporen. Viele Bakterien bilden Sporen. Wenngleich vielleicht die genauere Untersuchung bei einigen bisher nur sporenlos bekannten Arten noch Sporen nachweisen wird, so verliert dadurch dieses Merkmal seine prinzipielle Bedeutung für die Systematik keineswegs.

Die Kokken, Vibrionen und Spirillen scheinen überhaupt keine Sporen zu bilden, ebensowenig wie die mono- und lophotrichen Stäbchen. Von den übrigen Stäbchenbakterien sind z. B. sporenlos Typhus-, Coli-, Diphtherie- und Tuberkelbacillus, die gewöhnlichen Essigbakterien usw.; sporenbildend der Heu-, Kartoffel-, Wundstarrkrampf-, Buttersäurebacillus, viele thermophile Bakterien und viele andere. Man unterschied früher zwischen Endosporen und Arthrosporen, jenachdem die Spore im Innern einer Zelle entsteht oder sich die Zelle als ganzes zu einer Spore umwandelt. Wenngleich in alten Kulturen gelegentlich Individuen mit stark lichtbrechendem Inhalt und anscheinend derberer Membran gefunden werden, so ist doch über ihre Natur so wenig bekannt, daß die obige Unterscheidung vorläufig unbegründet ist. Alle gut bekannten Sporen sind Endosporen. Im Prinzip besteht die Sporenbildung in einer starken Verdichtung von Plasma und Umhüllung dieser kontrahierten, wasserärmeren Plasmamasse mit einer derben, schwer quellbaren und dadurch wasserundurchlässigen Membran. Die Sporen verdanken diesen Eigenschaften die Fähigkeit, lange Zeit außerhalb des natürlichen Lebenselementes der Bakterien, dem Feuchten, lebendig und keimfähig zu bleiben, und dienen so der Erhaltung der Art unter ungünstigen Bedingungen, aber auch der Ausbreitung, da sie leicht verstäubbar sind. Andererseits schützt die undurchlässige Membran gegen schädliche, am natürlichen Standort entstehende Stoffe, was besonders in der experimentell geprüften Widerstandskraft gegen Gifte zum Ausdruck kommt. Ein biologisch gleichgültiger Nebenerfolg der Wasserarmut des Plasmas und der schweren Durchlässigkeit der Membran ist die Widerstandskraft gegen trockene sowohl wie gegen feuchte Hitze, die übrigens bei den verschiedenen Arten ungleich groß ist.

Fig. 11. Sporenbildung. a Heubacillus. Vergrößerung 1000. Nach Migula. b Clostridium amylobacter. 1 vegetatives, 2 sporenführendes Stäbchen. Vergrößerung etwa 1200. Nach A. Fischer.

Die Sporenbildung kann auf zweierlei Weise erfolgen. Beim Heubacillus z. B. (vgl. Fig. 11a) zieht sich der größte Teil des Plasmas zusammen, so daß schließlich die glänzende Spore in der leeren Hülle des Mutterstäbchens liegt, das schon lange vorher seine Beweglichkeit eingebüßt hatte. Bei Clostridium amylobacter hingegen (Fig. 11b), das den anderen Typ veranschaulichen möge, beteiligt sich nur ein begrenzter Teil des Plasmas an der Sporenbildung, sodaß das sporenführende Stäbchen noch einige Zeit lebendig und beweglich bleibt. Dazu kommt noch ein weiterer Unterschied. Während das sporogene Stäbchen des Heubacillus zylindrisch bleibt, zeigt dasjenige des Buttersäurebacillus eine starke keulige oder spindlige Auftreibung an der Stelle, wo die Spore liegt. Beim Wundstarrkrampfbacillus und anderen Arten ist die Auftreibung ausgeprägt endständig, sodaß die sporogenen Stäbchen Stecknadelform annehmen (Fig. 12). Nach dem ersten Typus bilden sich z. B. noch

die Sporen des Milzbrand-, Kartoffel-, Wurzelbacillus usw., nach dem zweiten diejenigen vieler anaerober Gärungsbakterien.

Ganz abweichend ist die nachträgliche Formänderung des sporogenen Stäbchens bei dem marinen Bacillus sporonema, das sich an beiden Polen zu einem langen Fortsatz auswächst und so die Schwebefähigkeit der nicht herausfallenden Spore erhöht.

Im lebenden Präparat fallen die Sporen durch ihren starken Glanz auf, die Färbung gelingt erst nach vorheriger Beizung. Die Form ist gewöhnlich kuglig oder eiförmig, seltener langgestreckt oder eckig, die Oberfläche meist glatt, nur die Sporen des

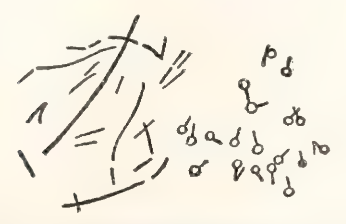


Fig. 12. Wundstarrkrampfbacillus im vegetativen und sporenführenden Zustand. Vergrößerung 1000. Nach Flügge.

Bacillus asterosporus z. B. zeigen eine Längsrippung. Fast alle Bakterien sind einsporig, selten sind Arten mit zwei Sporen. Eigenartig ist das Verhalten von Bacillus sporonema. Vor der Sporenbildung wird eine Zellteilung eingeleitet, dann aber wieder rückgängig gemacht, worauf die Spore in der Teilungsebene der Zelle angelegt wird. Ob dies ein primitiver geschlechtlicher Vorgang (Autogamie) ist, steht dahin. Unsicher ist es ferner, ob gewisse sehr winzige und bewegliche Gebilde, die gelegentlich in reinen Kulturen neben den Normalformen beobachtet wurden, etwa Schwärmsporen darstellen.

12. Sporenkeimung. Bei der Keimung quillt die Spore gewöhnlich mehr oder weniger auf, die Membran platzt und der Keimling tritt hervor. Die Sporenhülle bleibt oft eine Weile an seinem Fußende hängen, kann aber auch in zwei Kappen geteilt werden, welche seinen beiden Enden aufsitzen. Ausnahmsweise wächst das Keimstäbchen an zwei Stellen heraus, häufiger drängt es sich mit der mittleren Partie schleifenartig hervor, während die Enden zunächst in der Hülle bleiben. Der Ort, wo der Keimling austritt, ist verschieden; manche Arten keimen polar, andere äquatorial (Fig. 13). Selten unterbleibt das Aufplatzen ganz und die Spore streckt sich unter Verschleimung ihrer Membran zum Keimstäbchen.

13. Das System der Bakterien. Die Kleinheit, der Mangel leicht feststellbarer und prägnanter morphologischer Merkmale sowie die Umständlichkeit der Untersuchungsmethodik erschweren die Abgrenzung von Arten und Gattungen und ihre Gruppierung außerordentlich, so daß trotz verschiedener Versuche ein auch nur in seinen Grundzügen allgemein anerkanntes oder gar befolgtes System der Bakterien nicht vorliegt. Da



Fig. 13. Sporenkeimung. a äquatorial beim Heubacillus. Vergrößert 1500. Nach A. Fischer. b Polar beim Bacillus calfactor. Vergrößerung 1000.

außerdem der größte Teil der Bakteriologen bei der Beschreibung und Benennung der Bakterien sich nicht von systematischen Prinzipien leiten läßt, und andererseits die Zahl der botanischen Systematiker, die eine genauere Kenntnis der Bakterien besitzen, nur sehr klein ist, herrscht bei der Benennung der Bakterien die größte Willkür und Verwirrung.

An Merkmalen bieten sich zunächst einige wichtige morphologische dar, wie die Form, die Sporenbildung, die Begeißlung und die Wuchsart; dazu kommen die Dimensionen, das Aussehen der Kolonien, die Farbe, die Teilungsweise, die Beschaffenheit der Membran sowie Eigenheiten des Zellinhalts, Gallertbildung, Auftreten von Granulose, Schwefel, Verhalten bei der auf bestimmten chemischen Qualitäten beruhenden Gramschen Färbung und die sogenannte Säurefestigkeit usf. Namentlich bei der Unterscheidung der Arten reichen aber diese Merkmale vielfach nicht aus. Hier müssen physiologische hinzugezogen werden: Verflüssigung der Gelatine, Gärwirkungen, Lichtproduktion, Ansprüche an Temperatur und Nährstoffe, Verhalten dem Sauerstoff gegenüber, Pathogenität, besondere chemische Leistungen usw.

Das folgende System kann nur als ein provisorischer Versuch aufgefaßt werden, eine Uebersicht über die wichtigsten, einigermaßen nach morphologischen Merkmalen trennbaren Gattungen und ihre zweckmäßigste Gruppierung zu gewähren. Diese involviert auch keine phyletische Zusammengehörigkeit, obgleich manche Gruppen, wie die Familie der Spirillaceen, ziemlich natürlich ist. Ganz aus dem System ausgeschaltet sind die echten Fadenbakterien, die Myxobakterien und die Spirochäten. Einige ganz fragliche Arten sind am Schluß angefügt.

Bacteria. Einzellige Organismen mit fester Membran, ohne Zellkern und Chromatophoren. Ausschließlich ungeschlechtliche Vermehrung durch Zweiteilung, die bei den gestreckten Formen stets senkrecht zur

Längsachse erfolgt. Vielfach Bildung von Endosporen mit derber Membran. Beweglichkeit verbreitet, aber stets Schwimmbewegung, hervorgerufen durch verschieden angeordnete Geißeln. Grundformen: Kugeln, Stäbchen, Schrauben. Ernährungsweise fast ausschließlich heterotroph.

1. Familie Coccaceae (Zopf) Mig. Kugelbakterien. Grundform der Zellen kugelig. Keine Endosporen, zum Teil beweglich.
   - α) Allococci. Zellen teilen sich ganz gesetzlos (oder vielleicht regelmäßig nach den beiden Richtungen der Ebene, ohne daß jedoch konstante Wuchsformen zustande kommen). Demgemäß Einzel- und Doppelkokken, kurze Kettchen, Täfelchen, Häufchen durcheinander.
   1. Gattung Micrococcus (Hall.) Cohn, ohne Geißeln. Micrococcus pyogenes Eitererreger; Micrococcus gonorrhoeae Erreger der Gonorrhöe; Micrococcus citreus, Micrococcus roseus Farbstoffbakterien.
   2. Gattung Planococcus Mig., mit Geißeln. Planococcus citreus, aus Erbseninfus; Planococcus agilis; Planococcus thiophysa, große marine Schwefelbakterie (auch wohl die stickstoffbindende Erdbakterie Azotobacter agile).
   - β) Homococci. Bestimmte Teilungsfolge, die in gesetzmäßiger Lagerung der Kokken sich zeigt.
   3. Gattung Sarcina Goodsir. Gesetzmäßige Teilungsfolge nach den drei Richtungen des Raumes. Stets paketartige Würfel (neben ihren Zerfallsprodukten) Sarcina lutea, gelbe Farbstoffbakterie; Sarcina azotobacter (?), stickstoffbindende Erdbakterie.
   4. Gattung Planosarcina Mig., wie die vorige, aber begeißelt.
   5. Gattung Pediococcus Lindner. Teilungen nach den beiden Richtungen der Ebene gesetzmäßig folgend. Regelmäßige Bildung von Viererformen oder Täfelchen (neben ihren Zerfallsprodukten), Pediococcus tetragenus eine für Mäuse pathogene Art; Pediococcus thiopedia Schwefelbakterie.
   6. Gattung Streptococcus Billroth, Teilung nur nach einer Richtung des Raumes. Perlschnurartige Ketten, neben Einzel- und Doppelkokken. Unbeweglich. Streptococcus pyogenes, Eitererreger; Streptococcus lanceolatus, Pneumokokkus; Streptococcus mesenteroides, Froschlaichpilz; Streptococcus lactis acidi, eine Milchsäurebakterie.

2. Familie Bacteriaceae, Stäbchenbakterien. Zellen langgestreckt, meist zylindrisch oder aber etwas eiförmig, oder unregelmäßig aufgetrieben, gelegentlich nicht vollständig gerade, aber niemals schraubig. Teilung nur nach einer Richtung des Raumes. Je nach dem Zusammenhalt der Individuen lange oder kurze Ketten, Doppel- oder Einzelstäbchen. Viele beweglich, viele mit Endosporen.
   - a) Aciliatae, ohne Geißeln.
   - α) Asporogeneae, ohne Sporen.
   1. Gattung Bacter. Bacter phosphoreum, Leuchtbakterie aus der Nordsee; Bacter aceti, Essigbakterie; Bacter brunneum, Farbstoffbakterie; Bacter influenzae, Influenzabacillus.
   - β) Sporogeneae, mit Sporen.
   2. Gattung Bacterium. Ohne ausgeprägte Aenderung der zylindrischen Körperform bei der Sporenbildung; Plasma im sporogenen Stäbchen ganz verbraucht. Bacterium anthracis, Milzbrandbacillus.
   3. Gattung Closter. Sporogenes Stäbchen bauchig-spindlig oder schwach keulig angeschwollen. Nur ein Teil des Plasmas verbraucht.
   4. Gattung Plectrum. Spore endständig in dem scharf abgesetzten Kopfteil des trommelschlägelartig deformierten Stäbchens. Sonst wie oben. Plectrum foetidum, Käsebakterie; Plectrum fermentationis cellulosae, anaerober Zellulosezersetzer.
   - b) Circumciliatae, Geißeln über die Körperoberfläche verteilt.
   - α) Asporogeneae, ohne Sporen.
   5. Gattung Ciliobacter. Ciliobacter typhi, der Typhusbacillus; Ciliobacter coli, Kolibacillus; Ciliobacter prodigiosus, der rote Hostienbacillus.
   - β) Sporogeneae, mit Sporen.
   6. Gattung Bacillus (Cohn). Ohne Aenderung der Körperform bei der Sporenbildung, Plasma im sporogenen Stäbchen ganz verbraucht. Bacillus subtilis, Heubacillus; Bacillus mesentericus, Kartoffelbacillus.
   7. Gattung Clostridium Prazmowski. Wie Closter. Clostridium amylobacter, Buttersäurebakterie; Clostridium Chauveaui Rauschbrandbacillus; Clostridium oedematis maligni Bacillus des malignen Oedems.
   8. Gattung Plectridium A. Fischer. Wie Plectrum. Plectridium tetani, Tetanusbacillus; Plectridium putrificum anaerobe Fäulnisbakterie; Plectridium pectinovorum Pektinvergärer.
   - c) Lophociliatae. Geißeln nur an einem Pol. Sporen fehlen.
   9. Gattung Urobacter. Eine Geißel. Urobacter pyocyaneus Erreger des

blaugrünen Eiters; Urobacter chromatium große Purpurbakterie.

10. Gattung Lophobacter. Mehrere Geisseln. Lophobacter syncyaneus Bacillus der blauen Milch; Lophobacter fluorescens gelbgrün fluoreszierende gelatineverflüssigende Bakterie.

3. Familie Spirillaceae, Schraubenbakterien. Zellen schraubig gewunden, zum Teil nur einen Teil eines Schraubenumganges umfassend; gelegentlich zu mehreren längere Spiralen bildend. Polare Begeißlung. Keine Sporen.
   1. Gattung Vibrio (Müller-Löffler). Eine meist wellig gebogene Geißel. Vibrio cholerae Choleravibrio.
   2. Gattung Spirillum (Ehrenberg). Ein Schopf meist halbkreisförmig gekrümmter Geißeln. Spirillum undula Sumpfspirille; Spirillum volutans große Spirille des Brackwassers; Spirillum rubrum Purpurbakterie; Spirillum thiospirillum rote Schwefelspirille.

4. Familie Mycobacteriaceae, Pilzbakterien. Stäbchen von unregelmäßiger Form, gelegentlich etwas fädig und gebogen; auch in normalem Zustand bei einem Teil der Individuen oder aber durchgehends verzweigt. Kein Kettenwuchs, keine Endosporen, Beweglichkeit gewöhnlich fehlend.
   1. Gattung Mycobacterium Lehmann et Neumann. Stäbchen selten ganz gerade, meist gekrümmt von leicht welligem Umriß und unregelmäßigem Querdurchmesser. Länge der Zellen bei derselben Art stark wechselnd. Nach der Teilung, der ein bajonettartiges Stadium vorausgeht, biegen die Zellen seitlich aus und wachsen gleitend aneinander vorbei, wobei eine deutliche Plastizität zum Ausdruck kommt und sehr feste Verbände entstehen. Schwer zerreibliche Kolonien, auf Flüssigkeiten gewöhnlich Kahmhäute. Meist säurefest. Unbeweglich. Sehr langsames Wachstum. Gelatineverflüssigung fehlt. Mycobacterium tuberculosis Tuberkelbacillus; Mycobacterium leprae Leprabacillus. Verschiedene unbenannte auf Futter und Mist vorkommende Formen. Mycobacterium smegmae Smegmabacillus.
   2. Gattung Corynebacterium, Lehmann et Neumann. Keulige oder hantelförmige Individuen; kein Kettenwuchs, unbeweglich; keine Kahmhäute. Coryneba terium diphtheriae Diphtheriebacillus, Corynebacterium mallei Rotzbacillus.
   3. Gattung Brachiobacterium, sehr reichliche Verzweigung. Mycelartige Verbände, unbeweglich. Brachiobacterium Berestnewi eine rote Farbstoffbakterie.
   4. Gattung Rhizobium B. Frank. Rhizobium leguminosarum, in Wurzelknöllchen der Leguminosen mit korallenartiger Verzweigung, junge Individuen beweglich, peritrich, unverzweigt.

Anhang. Formen unsicherer systematischer Stellung: Spirosoma, unbewegliche Spiralen; Spirophyllum, flache gedrehte Bänder von ganz unbekannter Bauart; Galionella, zopfig umeinander gedrehte ungegliederte Fäden u. a. Die letzten beiden vielleicht zu den Trichobakterien gehörig.

Die Gattungen Bacter, Ciliobacter, Urobacter, Lophobacter, Closter, Plectrum, Clostridium, Plectridium, Mycobacterium, Corynebacterium, Brachiobacterium, Rhizobium werden gewöhnlich als Bacterium oder Bacillus bezeichnet. Eine gewisse Anerkennung hat die Bezeichnung Bacterium für unbegeißelte, Bacillus für peritrich begeißelte und Pseudomonas für lophotrich und monotrich begeißelte Stäbchenbakterien gefunden. Sporenbildung, Formänderung während derselben, Verzweigung usw. sind dann nicht berücksichtigt.

Literatur. *A. **Fischer**, Vorlesungen über Bakterien, 2. Aufl., Jena 1903. — **Günther**, Einführung in das Studium der Bakteriologie usw., 6. Aufl. 1906. — **Lehmann und Neumann**, Bakteriologische Diagnostik, 2 Bde., 4. Aufl., München 1907. — **A. Meyer**, Praktikum der botanischen Bakterienkunde, Jena 1903. — **Migula**, Allgemeine Morphologie usw. In Lafar's Handbuch der techn. Mykologie, 2. Aufl., Bd. I, Jena 1903. — **Schmidt und Weis**, Die Bakterien, Jena 1902.*

H. Miehe.

Bakterien.

Allgemeine Physiologie der Bakterien.

1. Die osmotischen Eigenschaften der Bakterienzelle. 2. Die stoffliche Zusammensetzung der Bakterienzelle. 3. Stoffwechsel: a) Stoffaufnahme und Assimilation. b) Dissimilation und Stoffabgabe. Gärungen. 4. Produktion von Licht und Wärme. 5. Allgemeine Lebensbedingungen. 6. Freie Ortsbewegung. 7. Variabilität und Erblichkeit.

1. Die osmotischen Eigenschaften der Bakterienzelle. Wenngleich bei vielen Bakterienarten die allzu geringe Größe oder auch unzulängliche Untersuchung bisher einen Einblick in die osmotischen Eigenschaften ihrer Zellen unmöglich gemacht hat, so ist doch für eine ganze Zahl derselben nachgewiesen, zum Teil auch aus dem mikroskopischen Anblick zu schließen, daß ihre Zellen ein in osmotischer Hinsicht den Zellen

höher organisierter Pflanzen analoges System darstellen. Rücksichtlich der Ernährung ergibt sich daraus so viel, daß lediglich gelöste Stoffe ins Innere der Bakterienzelle eindringen können, und weiter darf geschlossen werden, daß im wesentlichen dem lebenden Protoplasma und nicht der Zellhaut die Entscheidung darüber zufällt, ob Stoffe von außen nach innen oder umgekehrt treten. Der Nachweis, daß Protoplasma und Zellhaut gesonderte Gebilde sind, gelingt, wenn auch nicht immer, so doch oft durch Zusatz von Alkohol oder Jodlösungen zum mikroskopischen Präparat: das absterbende Protoplasma schrumpft stärker als die Zellhaut und hebt sich von ihr ab.

Weiteren Aufschluß über den osmotischen Bau der Bakterienzelle ergeben plasmolytische Versuche. Versuchen wir Bakterien zu plasmolysieren, so zeigt sich, daß wir sie in zwei, wenn auch nicht prinzipiell, so doch graduell verschiedene Gruppen einteilen können: die Vertreter der einen Gruppe, meist gramnegative Arten, lassen sich mit Lösungen von Kochsalz und anderen Stoffen plasmolysieren, allerdings geht die Plasmolyse nach einiger Zeit wieder zurück, da die plasmolysierenden Stoffe allmählich ins Innere eindringen. Ob dieser Rückgang vielleicht in manchen Fällen darauf beruht, daß die Bakterienzelle sofort Stoffe bildet (Kohlehydrate, organische Säuren usw.), deren osmotische Leistungen den Zellturgor wieder herstellt, ist noch unbekannt. Die Vertreter der anderen Gruppe, meist Gram-positive Formen, lassen sich überhaupt nicht plasmolysieren, da das Salz, und gleiches gilt von anderen sonst Plasmolyse bewirkenden Stoffen, sofort durch das Protoplasma in den Zellsaft eindringt.

Was nun die je nach Spezies und Lebensbedingungen wechselnde Höhe des osmotischen Druckes der Bakterienzelle angeht, so ist dieselbe mittels der plasmolytischen Methode natürlich nur bei Vertretern der ersten Gruppe zu bestimmen. Zellen von Spirillum undula und Cladothrix, die unter normalen Zuchtbedingungen leben, werden durch 1%ige Salpeterlösungen noch nicht, wohl aber durch 2%ige plasmolysiert. Danach würde der Binnendruck ihrer Zellen (unter der vielleicht falschen Voraussetzung, daß während des Plasmolysierungsversuches noch kein Salpeter in den Zellsaft eindringt), mehr als 3,5 und weniger als 7 Atmosphären betragen, und der Ueberdruck über den osmotischen Druck der Außenlösung, wenn wir diesen auf rund 2 Atmosphären veranschlagen, zwischen 1,5 und 5 Atmosphären liegen.

Ob dieser Ueberdruck bei Bakterien mit dem Wechsel der Lebensbedingungen schwankt, weiß man nicht, zumal nicht, ob er trotz wechselnder Konzentration der Außenlösung konstant bleibt. Das müßte der Fall sein, wenn die Anpassung an konzentriertere Lösungen durch Aufnahme der Stoffe der Außenlösung erfolgt; falls aber die Regulation der Turgorhöhe außerdem auch durch Bildung von Turgorstoffen erfolgt, ist es ebensowohl möglich, daß der innere Ueberdruck mit steigender Konzentration des Außenmediums wächst, und nicht minder, daß er bei einer bestimmten Konzentration der Außenlösung ein Maximum hat.

Wir erwähnen noch, daß diejenigen Stoffe, welche von dem Protoplasma höherer Pflanzen stets so schnell durchgelassen werden, daß sie keine Plasmolyse bewirken können (Glyzerin, Alkohol), auch bei Bakterien keine Plasmolyse auslösen. Sodann, daß beim Antrocknenlassen von Bakterienzellen an Objektträger oder Deckglas, wie es behufs Herstellung mikroskopischer Präparate üblich ist, unter Umständen Plasmolyse, sogenannte „Präparationsplasmolyse" eintreten kann.

Bei der zweiten Gruppe von Bakterien, deren Protoplasten also nicht nur Glyzerin, sondern auch die anderen Stoffe, Zucker, Salze, augenblicklich durchlassen, ist, wie schon gesagt, die Ermittelung des Turgors auf plasmolytischem Wege unmöglich. Doch kann man nicht daran zweifeln, daß auch sie unter normalen Bedingungen Turgor besitzen. Daß die Unterscheidung der Bakterien in nicht plasmolysierbare und plasmolysierbare auch ökologische Bedeutung haben dürfte, darauf deutet der Befund hin, daß die ersteren Bakterien in höher konzentrierten Medien leben können, als die letzteren.

Nach dem Gesagten sind die Prinzipien des Wassereintritts in die Bakterienzelle und der Leitung von Zelle zu Zelle in bakteriellen Zellverbänden klar. Die Bedingungen für Wassereintritt sind stets dann gegeben, wenn die osmotische Leistung des Zellsaftes die des Außenmediums (oder bei Kolonien, der Nachbarzelle) übertrifft und gleichzeitig die Möglichkeit einer Volumvergrößerung der Zelle sei es durch Wachstum, sei es durch Dehnung der Zellhaut vorliegt.

Ueber eine der wichtigsten den Stoffaustausch betreffenden Fragen, nämlich die nach der mit den Bedingungen wechselnden Durchlässigkeit des Protoplasmas für bestimmte Stoffe, wissen wir bei Bakterien noch nichts.

2. Die stoffliche Zusammensetzung der Bakterienzelle. Zuerst behandeln wir die Frage nach den Eiweißkörpern der Bakterienzelle. Durch geeignete Methoden gelingt es aus Bakterien echte Eiweißkörper

darzustellen, z. B. aus Bacillus subtilis ein Globulin, ferner ein Albuminat.

Ueber das Vorkommen charakteristischer Abbauprodukte von Eiweißkörpern in Bakterienleibern, Albumosen, Peptonen, Aminosäuren, Diaminosäuren u. a. m. ist nicht viel bekannt. In Eiweißstoffen aus Tuberkelbazillen konnten an Diaminosäuren Arginin und Histidin, Lysin aber nur in geringer Menge nachgewiesen werden.

Nukleoproteide bei den Bakterien: Solche, oder doch Stoffe, die als mit ihnen verwandt bezeichnet werden dürfen, wurden zuerst für den Heubacillus wahrscheinlich gemacht, sodann gelang es in einem „Trinkwasserbacillus“, wenn auch kein Nuklein, so doch Nukleinbasen nachzuweisen. Hierauf wurden aus Pest- und Cholerabazillenkulturen Nukleoproteide dargestellt, ferner aus einem dem Bacterium ranicida ähnlichen Spaltpilz. Auf andere Weise konnten Nukleoproteide aus Bacterium pyocyaneum, Bacillus megaterium, anthrax und Staphylococcus pyogenes aureus gewonnen werden. Eine reiche Literatur liegt weiter vor über das Vorkommen solcher Stoffe (tuberkulinsaures Protamin, Tuberkulinsäure und Nukleoproteide) im Bacterium tuberculosis, auch aus Diphtheriebazillen hat man Nukleoproteide und Nukleinsäuren darstellen können; im letzteren Fall neben den anderen charakteristischen Spaltungsprodukten der Nukleoproteide auch Pentosen.

Bei vielen Arten hat man mikroskopisch eine in Tröpfchenform in den Zellen sich abscheidende Substanz nachgewiesen, das sogenannte Volutin; für welches charakteristisch ist, daß es sich bei Zusatz von Methylenblau und verdünnter Schwefelsäure blau färbt. Es gibt nicht die Eiweißreaktionen; man deutet es mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit als „gesättigte oder saure Verbindung einer Nukleinsäure mit organischen Basen“, da Tröpfchen, die aus Nukleinsäure bestehen, dieselben mikrochemischen Reaktionen geben.

Kohlehydrate haben wir schon als Spaltungsprodukte von Nukleoproteiden kennen gelernt, und auch sonst sind die verschiedensten Kohlehydrate anzutreffen, so z. B. Glykogen oder doch verwandte Stoffe, auch dextrinähnliche Körper, ferner ein auf Zusatz von Jodlösungen sich bläuendes Kohlehydrat, das beim Bacillus amylobacter vorkommt, früher Granulose, neuerdings auch Iogen genannt. Der Charakter als Reservestoff, die Aufstapelung vor und der Verbrauch bei der Sporenbildung läßt sich beim Iogen besonders hübsch demonstrieren. Ueber Kohlehydrate in der Zellhaut vgl. später.

Die Fette sind sodann als Reservestoffe weit verbreitet bei den Bakterien. Ueber das Fett und verwandte Stoffe des Tuberkuloseerregers existiert eine ganze Literatur. Mikroskopisch ist das Fett in Form kleiner glänzender Tröpfchen im Innern der Zellen nachweisbar und seiner Natur nach durch Färbung mit Fettfarbstoffen zu erkennen.

Chemie der Zellwandstoffe: Die oft wiederkehrende Behauptung, daß bei manchen Bakterien Cellulose vorkomme, ist unbewiesen. Nicht selten wird aus der Blaufärbung der Zellwände, die nach Einwirkung von Jodlösungen bei manchen Arten auftritt, fälschlich auf Cellulose geschlossen. Bei manchen Arten soll Chitin in der Zellhaut vorhanden sein; doch wird diese Angabe bestritten.

Es wird auch behauptet, daß sich Eiweißkörper am Membranbau beteiligten, und die Meinung ist verfochten worden, daß die Zellwand der Bakterienzelle in gewissen Fällen nur eine äußere Protoplasmaschicht, eine sogenannte Pellicula sei. Eine sichere Entscheidung in diesen Fragen ist heutigen Tages nicht möglich; doch sei noch darauf hingewiesen, daß die sehr eigenartigen Löslichkeitsverhältnisse der Bakterienzellwände in Cholsäure und verwandten Stoffen vielleicht dazu beitragen könnten, die Kenntnisse zu fördern.

Als Resultat ergibt sich also, daß wir über den chemischen Aufbau der Wandungen nichts wissen. Auch über die chemische Zusammensetzung der Sporenwandungen ist nichts bekannt.

Die Außenhüllen, die als Gallertschichten der Zellhaut vielfach aufgelagert sind, oder einen die Nährlösung erfüllenden Schleim bilden, bestehen beim Leuconostoc mesenterioides aus Dextran, d. h. einem Kondensationsprodukt von Traubenzucker. In anderen Fällen ist der Schleim stickstoffhaltig und als Mucin angesprochen, oder auch als dem Chitin nahestehend befunden worden.

Um das Bild vom chemischen Aufbau der Bakterienzelle zu vervollständigen, müßten wir noch einer Unzahl anderer Stoffe gedenken, die an ihrer Zusammensetzung dauernd oder vorübergehend teilnehmen können, doch würde das zu weit führen und wir werden auch nachher bei Behandlung des Stoffwechsels noch auf einige derselben zu sprechen kommen; vor allem wären hier die Enzyme zu nennen, betreffs deren wir auf die Artikel „Stoffwechsel“ und „Enzyme“ verweisen können.

Wir beschränken uns hier darauf, die Farbstoffe noch zu nennen: Wir beobachten gelbe, rote, blaue, grüne, braune, schwarze Farben, auch fällt uns das Vorkommen fluoreszierender Farbstoffe auf. Wir teilen die farbstoffbildenden Bakterien

ein in die chromoparen, welche den Farbstoff nach außen abscheiden, in parachromophore, deren Zellwand gefärbt ist, und endlich in chromophore Bakterien, welche den Farbstoff in ihrem Zellinnern führen.

Bei den chromoparen Bakterien haben wir zu unterscheiden solche, die den Farbstoff in ungelöster von solchen, die ihn in gelöster Form ausscheiden. Von gelösten, darum in den Nährboden diffundierenden Farbstoffen ist der bekannteste das Bacteriofluorescin, in wässeriger Lösung orangegelb gefärbt und je nach der Reaktion der Lösung blau oder grün fluoreszierend. Bei Bacterium pyocyaneum ist es vergesellschaftet mit dem blauen Farbstoff Pyocyanin, beim Bacterium der blauen Milch mit „Syncyanin". Das Pyocyanin soll erst als Leukofarbstoff gebildet und durch den Sauerstoff zu dem blauen Farbstoff oxydiert werden.

Die wasserunlöslichen Farbstoffe chromoparer Bakterien, die häufig rot oder gelb sind, werden eingeteilt in carotinähnliche, die auf Zugabe von konzentrierter Schwefelsäure blaugrün, und in die sogenannten Prodigiosinfarbstoffe, am besten bekannt durch das Vorkommen in den Kulturen des Bacterium prodigiosum (Bakterie der blutenden Hostie), die durch Schwefelsäure braun werden. Das Prodigiosin wird in Form kleiner Körnchen in der Nachbarschaft der Bakterienzellen abgelagert. Bei Bacterium chlororaphis wird der Farbstoff in Form kleiner grüner Kristalle abgeschieden.

Wenig untersucht sind die parachromophoren Bakterien mit gefärbter Zellwand, z. B. Bacterium violaceum. Die schwarze Färbung mancher Spaltpilze kann durch Schwefeleisen bedingt sein.

An chromophoren Bakterien werden zunächst grüne Bakterien beschrieben, bei denen der Farbstoff das ganze Protoplasma gleichmäßig durchtränken soll. Sie sollen am Licht Sauerstoff ausscheiden, der Farbstoff hätte danach dieselbe Funktion wie das Chlorophyll, die ganze Frage ist noch nicht spruchreif. Genauer untersucht sind unter den chromophoren Bakterien die Purpurbakterien (vgl. den Artikel „Bakterien. Schwefelbakterien").

Ueber die Bedeutung der Farbstoffproduktion ist wenig bekannt. Der Farbstoff einiger chromoparer und parachromophorer Formen bindet Sauerstoff locker und gibt ihn nachher im sauerstofffreien Raum wieder ab. Beachtenswert ist die Abhängigkeit der Farbstoffbildung von den Lebensbedingungen der Bakterien. Chromopare Arten wachsen bei stark erhöhter Temperatur, bei ungenügender Sauerstoffzufuhr, bei ungenügender Ernährung usw farblos.

3. Stoffwechsel. 3 a) Stoffaufnahme und Assimilation. Bekanntlich besteht die Lebenstätigkeit aller, somit auch der Bakterienzellen in einem dauernden Stoffaufbau (Assimilation) und Abbau (Dissimilation). Dieser hat in erster Linie die Bedeutung, als Energiequelle für alle Lebensleistungen zu dienen; jener ist nötig zum Ersatz der Stoffe, die dem Abbau verfallen, und zur Bildung neuer lebender Zellen, zum Wachstum und zur Vermehrung. So läßt sich denn der Stoffwechsel gliedern in „Baustoffwechsel" und „Betriebsstoffwechsel". Während sich in diesen allgemeinen Zügen das Leben der Bakterien ebenso abspielt wie das aller anderer Wesen, lassen sich doch mit Rücksicht auf den Aufbau wie auf den Abbau von Stoffen einige, für die Bakterien charakteristische Züge herausheben, die sich zwar auch schon in dem Stoffwechsel anderer Mikroorganismen finden, bei den Bakterien aber besonders deutlich ausgeprägt sind.

Was den Stoffaufbau angeht, so ist für die Bakterien kennzeichnend, daß der erste Schritt desselben, die Stoffaufnahme, eine ganz außerordentlich verschiedenartige ist: Die Verschiedenheit in den Ansprüchen der Bakterien an die Nährstoffe bedingt einen der größten Reize, der in der Beschäftigung mit der Bakterienphysiologie liegt.

Was den Stoffabbau der Bakterien betrifft, so nimmt dieser in vielen Fällen einen weitaus größeren Umfang an, als wir es bei anderen Pflanzen zu sehen gewohnt sind, einen Umfang, der uns besonders dann oft überrascht, wenn wir ihn mit der Geringfügigkeit des damit Hand in Hand gehenden Aufbaues vergleichen. Wir erinnern hier nur kurz an jene gewaltigen Zertrümmerungen von Stoffen, die auch dem Laien ohne weiteres als „Gärungen" in die Augen fallen, sind doch Gärungen nichts weiter als Dissimilationserscheinungen besonders auffallender Art, auffallend sowohl mit Rücksicht auf die Größe des Umsatzes wie auf die Art der Stoffe, die dabei gebildet werden, Stoffwechselvorgänge, die ihren Erregern Energie spenden, außerdem durch die Produkte, die sie liefern, manchen Nutzen gewähren können und zu deren Durchführung sie durch Bildung von Enzymen befähigt sind.

Wir wenden uns nunmehr den einleitenden Schritten der Assimilation, der Aufnahme der einzelnen Stoffe zu, indem wir fragen, welche chemischen Elemente in den Stoffwechsel der Bakterien gezogen werden, und ob sie in freier Form, oder gebunden in die Zelle eintreten.

Wasserstoff: Dies chemische Element wird nicht nur aus Wasser, sondern auch in einer ganz großen Zahl anderer, anorganischer wie organischer Nährstoffe in gebundener Form zugeführt. Was den freien Wasserstoff angeht, so wird er von vielen Bakterien bei Gärungen frei gemacht, von einigen wenigen Bakterien auch wieder gebunden („Wasserstoffprototrophie") und zu Wasser oxydiert.

Was den Sauerstoff anlangt, so wird auch er in gebundener Form mit dem Wasser und vielen anderen Verbindungen den Bakterien zugeführt. Uebrigens weiß jeder biologisch Interessierte, daß sich die Bakterien ihm gegenüber verschieden verhalten. Es gibt Bakterien, welche unbedingt freien Sauerstoff zu ihrem Leben nötig haben („aerobe"), solche, die ganz ohne freien Sauerstoff gedeihen, und größere Mengen desselben überhaupt nicht ertragen („anaerobe") und endlich solche, welche sowohl ohne Sauerstoff als auch bei Zutritt größerer Mengen dieses Gases leben können („fakultativ anaerobe Bakterien"). Genauere Untersuchung zeigt, daß für jede Bakterienart ein Minimum, Optimum und Maximum des Sauerstoffgehalts festgestellt werden kann. Somit könnte eigentlich nur die Angabe dieser drei „Kardinalpunkte" die Beziehungen jeder Bakterienart zum freien Sauerstoff genau kennzeichnen. Da das wenigstens vorläufig praktisch undurchführbar ist, kann man die Bakterien auch zunächst in zwei Gruppen unterbringen, die aerophilen, die den Sauerstoffgehalt der Luft (276 mg im Liter) noch ertragen, und die aerophoben, die bei diesem Gehalt an Sauerstoff nicht mehr wachsen.

Besonders zu beachten ist, daß es „obligat anaerobe" Bakterien nicht gibt, daß alle, die man früher so nannte, geringe Spuren von Sauerstoff vertragen können, und es hat sich auch gezeigt, daß sie dieselben veratmen.

Der weiteren Aufklärung bedürftig ist aber die Frage, inwieweit die Grenzen der zulässigen Sauerstoffkonzentration durch besondere Ernährungsbedingungen oder durch allmähliche Anpassung verschoben werden können.

Es ist sodann daran zu erinnern, daß verschiedene Funktionen der Bakterienzelle in ungleicher Weise vom Maß des Sauerstoffzutritts abhängen. Die Kardinalpunkte des vegetativen Wachstums gelten auch für die Sporenkeimung, während die Sporenbildung häufig in engere Grenzen eingeschlossen sein dürfte. Das Letztere scheint allerdings für die luftscheuen nicht zu gelten, denn diese sollen bei allzu reichlichem Luftzutritt das Wachstum einstellen und Sporen ausbilden.

Wir wenden uns nun den Elementen zu, die gewöhnlich in Form von mineralischen Salzen von den Bakterien aufgenommen werden und als „Nährsalze" in den Kultursubstraten geboten werden, übrigens vielfach auch in Form organischer Verbindungen den Bakterien zugänglich sind.

Phosphor: Dieser muß in irgendwelcher assimilierbaren Form allen Bakterien geboten werden, damit sie wachsen können, was leicht begreiflich, da Nukleoproteide und andere phosphorhaltige Körper, z. B. Lecithane (d. i. Phosphatide und Lecithin), am Aufbau der Bakterienzelle teilnehmen. Auch anorganische Phosphate dürften häufig Konstituenten der lebenden Bakterienzellen sein, z. B. als Turgorstoffe in der Form von Alkaliphosphaten.

Gewöhnlich setzt man den Phosphor in Form von Alkaliphosphaten den Nährlösungen zu, aber auch die Phosphate der Erdalkalien sind hinreichend löslich, um von den Bakterien aufgenommen zu werden, nötigenfalls werden sie durch die Atmungskohlensäure oder durch im Stoffwechsel gebildete organische Säuren in Lösung überführt.

Schwefel: Auch die Hinzufügung von Schwefel zu Bakterienkulturen in geeigneter Form ist von Bedeutung, da Bakterieneiweiß wie die anderen Proteine schwefelhaltig ist. Meistens genügt man dieser Forderung durch Zusatz eines Sulfats. Aber auch andere schwefelhaltige Körper, Schwefel selbst („Schwefelprototrophie"), Schwefelwasserstoff, organische Körper, wie Proteine, können im allgemeinen bei sonst günstigen Bedingungen den Bedarf decken.

Das Kalium ist gleichfalls ein unentbehrliches „Nährelement". Man pflegt es in Form eines Kalisalzes zuzugeben. Wie bei anderen mineralischen Nährstoffen genügen auch hier recht kleine Mengen, um starke Vegetationen zu erzielen.

Bei der Kultur einiger Bakterien (z. B. Bacterium pyocyaneum, nicht aber z. B. Azotobacter) kann es mit Erfolg durch Rubidium- und Caesiumsalze vertreten werden. Deren Brauchbarkeit gilt aber nur innerhab engerer Konzentrationsgrenzen als die der Kalisalze. Natrium und Ammoniumsalze können nach den bisherigen Versuchen die des Kaliums nicht vertreten. Warum das Kalium für den Stoffwechsel von Bedeutung ist, weiß man nicht.

Magnesium: Magnesiumsalze müssen den Bakterien gleichfalls dargeboten werden. Versuche, dies Element durch andere, etwa durch Calcium zu ersetzen, mißlingen.

Jedenfalls besteht zwischen Bakterien (und anderen niederen Pflanzen) und höheren Gewächsen insofern ein beachtenswerter Unterschied, als letztere Magnesium und Calcium zu ihrer Ernährung unbedingt nötig haben.

Dies wären die unerläßlichen mineralischen Nährstoffe; eine Nährsalzmischung, welche Kaliumphosphat und Magnesiumsulfat enthält, ist also ausreichend. Doch sind auch viele andere Mineralstoffe, wenn nicht nötig, so doch oft nützlich und finden sich natürlich auch in der Bakterienzelle am natürlichen Standort vielfach vor. Calcium wirkt in Form seiner Salze oft günstig auf das Bakterienwachstum ein, das Wesen dieser Wirkung ist noch unbekannt. Auch Schwermetalle sind oft wachstumsbefördernd,

wenn sie nur in geringer Menge geboten werden. Ihre Giftwirkung schlägt dann, wie bei allen Giften, in stimulierende Reizwirkung um. Eisenzugaben wirken oft recht gut, es wird auch die Ansicht vertreten, Eisen sei als Nährstoff unentbehrlich, aber in sehr geringen Mengen ausreichend. Die auffallend günstige Wirkung, die bei Zugabe von Humus zu den Bakteriennährlösungen in vielen Fällen beobachtet wurde, wird neuerdings auf den Eisengehalt der Humusstoffe zurückgeführt, von Anderen auf eine kombinierte Wirkung von Eisen, Aluminium und Kieselsäure. In manchen Fällen ist es besser statt reiner Nährsalze Gemische solcher mit anderen Salzen zu verwenden, wie sie z. B. in Heu- oder anderen Absuden, Fleischwässern, in dem von den Bakteriologen fast bis zur Erschöpfung verwendeten Fleischextrakt als Zufuhrmittel für Nährsalze vorliegen. Das hat seinen Grund darin, daß man wie für andere Pflanzen und Wesen so auch für Bakterien festgestellt hat, daß einzelne Salze, für sich allein geboten, eine mehr oder minder schädliche Wirkung ausüben können — das gilt auch für Nährsalze — und daß diese schädliche Wirkung durch gewisse andere Salze aufgehoben wird. Oft zeigt sich, daß bestimmte Salzgemische besonders günstig sind, weil dann die Entgiftung am vollkommensten ist, sogenannte „balanzierte Lösungen". Endlich sei daran erinnert, daß man die für viele Spaltpilze günstige alkalische Reaktion meist durch alkalisch reagierende Salze, kohlensaures Natrium, alkalisch reagierende Phosphate herbeiführt. Ist saure Lösung erwünscht, so kann sie durch Zugabe von sauren Salzen oder Säuren erzielt werden.

Im allgemeinen sollen Nährsalze nur in geringen Konzentrationen geboten werden, dies gilt aber nicht für solche Bakterien (Meeresbakterien, Leuchtbakterien), die nur an salzreichen Standorten, z. B. im Meere, leben oder solche Standorte bevorzugen und eine stärkere osmotische Leistung der Substrate verlangen. Zusatz von Seesalz zur Nährlösung empfiehlt sich hier meist mehr als die Verwendung eines Salzes, etwa Chlornatrium, weil Seewasser eine besonders gut „ausbalanzierte" Lösung ist.

Kohlenstoff und Stickstoff. Während die bislang genannten Nährelemente von allen Bakterien in Form von Mineralsalzen aufgenommen werden können, sind die Ansprüche, welche die verschiedenen Bakterien an die Versorgung mit Stickstoff und Kohlenstoff stellen, so weitgehend verschieden, daß man auf Grund dieser die Bakterien zu verschiedenen ernährungsphysiologischen Gruppen zusammenfassen kann. Vor allem ist die Frage zu stellen, ob Kohlenstoff und Stickstoff in freier Form, d. h. als Element oder in Form anorganischer oder endlich organischer Verbindungen aufgenommen werden.

Da ist zunächst zu sagen, daß von einer Aufnahme des Elementes Kohlenstoff („Kohlenstoffprototrophie") nichts bekannt ist, nur Oxydation amorpher Kohle durch Bakterien ist nachgewiesen. Was andererseits den freien Stickstoff angeht, so vermögen nicht wenige Bakterien diesen als Stickstoffquelle zu benutzen. Diese, wohl auch als Stickstoffprototrophe zu bezeichnenden Bakterien werden in diesem Werk gesondert behandelt (S. 806).

Wenden wir uns nun den Verbindungen des Kohlenstoffs und Stickstoffs zu und zwar zunächst den anorganischen. Als anorganische Kohlenstoffverbindungen kommen für die Bakterienernährung das Kohlenoxyd und die Kohlensäure, als anorganische Stickstoffverbindungen die Ammonium-, salpetrigen und salpetersauren Salze in Frage (über Aufnahme von Stickoxydul vgl. unten).

An organischen Kohlenstoffverbindungen haben wir Legion, es handelt sich um Fett- und andere organische Säuren, um Alkohole, Fette, Kohlehydrate, Aminosäuren, Amide, Peptone, Albumosen, Proteine u. v. a. m. Die organischen Stickstoffverbindungen, die in Betracht kommen, sind in den aufgeführten Kohlenstoffverbindungen, soweit sie gleichzeitig stickstoffhaltig sind, schon genannt; sie können den Bakterien nicht nur als Kohlenstoffquelle, sondern gleichzeitig als organische Stickstoffverbindungen dienen. Es sind dies also vornehmlich die Eiweißstoffe und ihre Spaltungsprodukte.

Man pflegt diejenigen Bakterien, welche sowohl den Kohlenstoff als auch den Stickstoff aus anorganischer Bindung sich aneignen, als die autotrophen Bakterien zu bezeichnen; für diese ist es charakteristisch, daß nicht nur die Nährstoffe im engeren Sinne, die zum Aufbau des Körpers dienen, sondern auch diejenigen Stoffe, durch deren Zersetzung sie sich die nötige Energie zum Aufbau beschaffen, ihre Kraftquellen, anorganischer Natur sind; die Autotrophen sind somit in jeder Beziehung lediglich auf die Zufuhr und Verwertung anorganischer Stoffe angewiesen. Ueber die Methanbakterien vgl. unten.

Im Gegensatz dazu bezeichnet man als heterotroph diejenigen Bakterien — und das ist die ganz überwiegende Mehrzahl —, welche auf die Zufuhr organischer Stoffe, die ihnen einmal als Bausteine, zum anderen Mal als Energiequelle dienen, angewiesen sind. Unter ihnen gibt es sowohl solche, die bei Zufuhr organischer Kohlenstoffquellen und anorganischer Stickstoff-

quellen gedeihen können, als auch anspruchsvollere, die den Stickstoff gleichfalls aus organischen Verbindungen assimilieren.

Die Heterotrophen teilt man in altbekannter Weise auch ein in Saprophyten, welche auf toten organischen Massen leben und in Parasiten, welche den lebenden Körper anderer Wesen befallen, eine ökologische, nicht physiologische Einteilung, die für das Leben der Heterotrophen am natürlichen Standort Berechtigung hat. Wenn Parasiten den lebenden Organismus als Standort bevorzugen, so hängt das damit zusammen, daß sie dort die ihnen zusagende Nahrung, Eiweißkörper und andere organische Stickstoffverbindungen, vielfach auch die ihnen zusagende Temperatur (Parasiten der Warmblüter) vorfinden.

Um eine noch weitergehend abgestufte, auf ernährungsphysiologischer Grundlage aufgebaute Uebersicht über die Bakterien zu erhalten, hat man sie wohl auch noch in eine größere Zahl von Gruppen eingeteilt, die sich durch die verschiedenen Ansprüche an die Stickstoffquelle unterscheiden. Wir charakterisieren die Gruppen dadurch etwas genauer, daß wir gleichzeitig das Wichtigste über die Ansprüche an die Kohlenstoffquelle mitteilen und bemerken, daß scharfe Grenzen zwischen den Gruppen nicht existieren, ändern sich doch die verschiedenen Ansprüche mit den sonstigen Außenbedingungen.

Wir haben 1. die Stickstoff-Prototrophen, die vom freien Stickstoff leben können. Sie sind sämtlich heterotroph, bedürfen Zucker oder andere Kohlenstoffquellen. Können auch von Stickstoffverbindungen leben.

2. Nitrat- und Nitrit-Bakterien und Ammon-Bakterien. Früher war die Meinung verbreitet, daß es überhaupt keine oder fast keine Bakterien gebe, die Nitrate (oder Nitrite) verwenden könnten; man hielt sie, soweit sie überhaupt von anorganisch gebundenem Sauerstoff leben können, für Ammonorganismen. Jetzt weiß man aber, daß es recht viele gewöhnliche Bakterien im Kot, im Ackerboden usf. gibt, die Nitrate zum Aufbau verwerten. Uebrigens sind die unter 2. genannten Bakterien entweder hetero- oder autotroph. Die heterotrophen können alle statt der anorganischen Stickstoffverbindungen sich auch von organischen nähren, bevorzugen solche sogar vielfach. Die autotrophen sind im allgemeinen auf anorganische Stickstoffverbindungen angewiesen.

3. Amidbakterien bevorzugen Aminosäuren, Amide usf., z. B. Asparagin oder ähnliche, können aber auch von anderen organischen Stickstoffverbindungen leben; anorganische Stickstoffverbindungen sind untauglich.

4. Peptonbakterien gedeihen am besten bei Zufuhr von Pepton, Albumosen. Sie vermögen einerseits Proteine mangels der erforderlichen Enzyme nicht anzugreifen, begnügen sich andererseits auch nicht mit einfacheren Stickstoffverbindungen, als Peptonen.

5. Proteinbakterien sind auf Zufuhr von Proteinen angewiesen oder gedeihen doch bei deren Zufuhr am besten. Die unter 3 bis 5 genannten Bakterien sind natürlich alle heterotroph. Beachtenswert ist, daß sie häufig — eine Ausnahme machen im allgemeinen Proteinbakterien — dann besonders gut zu gedeihen pflegen, wenn ihnen außer der organischen Stickstoff- und Kohlenstoffverbindung noch eine stickstofffreie Kohlenstoffverbindung, wie Zucker oder ähnliches geboten wird, welche dann in erster Linie Atmungszwecken dient.

Von manchen Peptonbakterien wird angegeben, daß sie überhaupt nur dann kräftig wachsen, wenn sie außer Pepton (richtiger Albumosen) noch eine besondere Kohlenstoffquelle zur Verfügung erhalten: sogenannte Pepton-Kohlenstoffbakterien.

Wir zählen nun die bisher bekannt gewordenen autotrophen Bakterien auf: 1. die nitrifizierenden Spaltpilze (vgl. den Artikel „Bakterien. Nitrifikation“); 2. die Schwefelbakterien (vgl. den Artikel „Bakterien. Schwefelbakterien“); 3. die Eisenbakterien, die zum Teil autotroph leben (vgl. den Artikel „Bakterien. Eisenbakterien“).

Autotroph sind 4. die Bakterien, welche Wasserstoff oxydieren, also Knallgas als Energiequelle verwerten, indem sie es zu Wasser verbrennen, und auf Kosten der dabei freiwerdenden Energie die Kohlensäure reduzieren. Den Stickstoff entnehmen sie Nitraten oder Ammoniumsalzen. Den neuesten Arbeiten zufolge gibt es zwei Stäbchen, Bacterium vitreum und flavum, die beide in Reinkultur die Katalyse des Knallgases durchführen, falls die Konzentration des Sauerstoffs nicht zu groß ist. Anderenfalls vermögen sie nur in Gemeinschaft („Symbiose“) miteinander die genannte Funktion auszuüben. Durch die Tätigkeit dieser im Ackerboden weit verbreiteten Bakterien wird ein Teil des Wasserstoffs, der in nicht unerheblichen Mengen auch durch Bakterientätigkeit frei gemacht wird, wieder in gebundene Form überführt. Man kann sie auch ohne Knallgaszufuhr bei Darbietung organischer Stoffe kultivieren, sie sind also fakultativ autotroph.

Es werden dann in der Literatur auch Bakterien kurz erwähnt, welche imstande sind, bei Abschluß der Luft Wasserstoff zu verbrennen und Kohlensäure zu assimilieren, indem sie den dafür nötigen Sauerstoff durch die Spaltung schwefelsaurer Salze gewinnen. Ferner werden kleine, unbewegliche Stäbchen beschrieben, welche Stickoxydul und Wasserstoff in Wasser und Stickstoff umsetzen und so die Energie zum autotrophen Leben gewinnen sollen.

Schließlich werden Bakterien autotropher Art beschrieben, welche sich die Energie zu diesem Lebenswandel durch Oxydation von Kohlenoxyd verschaffen.

Die Physiologie aller dieser autotrophen Formen ist noch recht unbekannt. Es ist zweifelhaft, welches die ersten Assimilationsprodukte der Kohlensäure in dem Bakterienleib sind. Un-

bekannt ist ferner überall, in welcher Weise die energiespendenden Prozesse mit dem Stoffaufbau durch die Zellen verkettet sind. Endlich weiß man nicht, ob für die verschiedenen Arten die charakteristischen Oxydationen anorganischer Stoffe die einzigen Oxydationen sind, die von den Autotrophen unterhalten werden oder ob sie außerdem wie andere Wesen auch organische Stoffe veratmen.

Die Menge organischer Substanz, die die autotrophen Bakterien aus Kohlensäure bilden, dürfte gegenüber der von den grünen Pflanzen erzeugten kaum ins Gewicht fallen. Auch sind sie nicht durchweg unabhängig in ihrer Kraftquelle von anderen Organismen, ihre Kraftstoffe, Wasserstoff, Ammoniak usw. werden ihnen zum großen Teil erst durch die Tätigkeit heterotropher Wesen geliefert.

Sozusagen auf der Grenze zwischen heterotrophen und autotrophen steht das Bacterium methanicum, welches mit Rücksicht auf die Baustoffe autotroph ist, es lebt von Kohlensäure und mineralischen Salzen, aber mit Rücksicht auf die Kraftquelle heterotroph, indem es das Sumpfgas, Methan, zu Kohlensäure und Wasser oxydiert und sich so die nötige Energie zur Reduktion der Kohlensäure verschafft. Wie das Methan seine Entstehung bakteriellen Prozessen verdankt, so schwindet es also auch wieder durch Bakterientätigkeit, soweit das nicht ohne Mitwirkung von Lebewesen geschieht.

Früher nahm man an, daß die Purpurbakterien, welche gleichzeitig zum Teil Schwefelbakterien sind, zum Teil aber niemals Schwefel im Zellinnern abscheiden mittels der durch ihren Farbstoff absorbierten Sonnenenergie imstande wären, die Kohlensäure zu assimilieren. Neuerdings aber hat sich ergeben, daß man die Purpurbakterien in Reinkultur nur bei reichlicher Zufuhr von organischen Verbindungen züchten kann und daß sie nicht, wie Chlorophyllpflanzen, Sauerstoff im Licht ausscheiden. Es muß also ungewiß bleiben, welche Bedeutung der Farbstoff hat und warum diese Wesen, wenn sie Licht zu ihrem Gedeihen auch nicht eben nötig haben, doch durch die Licht- bezw. Wärmestrahlen in ihrem Gedeihen gefördert werden. Weiteres s. in Artikel „Bakterien. Schwefelbakterien".

Wir kommen nun zu den heterotrophen Formen, die auf organische Stoffe irgendwelcher Art angewiesen, im übrigen ganz verschiedene Ernährungsbedingungen haben, zum Teil sehr anspruchslos sind und mit ganz einfachen Fettsäuren als Kohlenstoff- und anorganischen Stickstoffsalzen als Stickstoffquelle auskommen, zum Teil zu den anspruchvollsten Wesen gehören und komplizierte Eiweißkörper zu ihrer Ernährung bedürfen. Hierher gehören die allermeisten Bakterien, die „Totengräber der lebendigen Natur", da die organischen Stoffe, die sie aufnehmen, nur zum geringeren Teil als Baustoffe dienen, zum weitaus größeren Teil aber dissimilatorisch zerstört und mineralisiert werden, um in dieser Form den grünen Pflanzen wiederum als Nährstoffe zu dienen. Während wir bei den autotrophen die Stoffe, welche als Bausteine dienen, d. h. die Kohlensäure und die Mineralsalze von den Kraftquellen, z. B. dem Wasserstoff und Sauerstoff bei den wasserstoffoxydierenden Autotrophen scharf trennen können, müssen wir bei der Besprechung der Physiologie der Heterotrophen diese Scheidung zwar begrifflich ebensogut vornehmen, de facto aber können wir es nicht, da es dieselben Stoffe sind, welche dem Aufbau und der Spendung von Energie dienen. Nimmt z. B. ein fäulniserregender Spaltpilz Eiweißstoffe auf, so spaltet er dieselben zunächst; ein Teil der Produkte dient dem Aufbau neuer lebender Substanz, ein anderer wird weiter dissimiliert und wieder nach außen abgeschieden. In den wenigsten Fällen kennen wir den Stoffwechsel hinreichend genau, um die Vorgänge im einzelnen überschauen zu können und es ist auch festgestellt, daß Stoffe, die zunächst für den Aufbau bestimmt waren, unter bestimmten Umständen, bei Aenderung der Lebenslage usw. abgebaut werden. Kurz, die verschiedenartigen Umwandlungen, welche die organischen Stoffe von ihrem Eintritt in die Zelle ab durchlaufen, dienen sowohl der Assimilation als auch der Dissimilation, ohne daß wir hier scharfe Grenzen ziehen könnten. Aus diesem Grunde wollen wir Stoffaufnahme und Wandlungen durch die Heterotrophen im einzelnen erst später, gemeinsam mit der Besprechung der wichtigsten Dissimilationsvorgänge bringen. Hier noch einige allgemeine Ausführungen!

Wenn wir von verschiedenen Ansprüchen verschiedener heterotropher Bakterienarten sprechen, so dürfen wir nicht vergessen, daß nicht nur die Qualität, sondern auch die Quantität der Stoffe eine Rolle spielt. Manche Formen, die in natura sehr nährstoffreiche Standorte bewohnen, werden auch in unseren Kulturen reichliche Nahrungszufuhr erheischen oder doch vertragen, andere werden zwar dieselben Stoffe verdauen können, aber nur wenn sie in geringer Menge geboten werden.

Lehrreich in dieser Beziehung sind Erfahrungen an Wasserbakterien, die oft nur sehr geringe Quantitäten von guten Nährstoffen, wie etwa Zucker vertragen können; mit wie wenig manche Formen auskommen können, lehrt z. B. das Bacterium oligocarbophilum, das mit noch unbekannten flüchtigen organischen Stoffen, die in der Atmosphäre vorkommen, sein Auslangen findet und aus diesem Grund auch als „Luftreiniger" bezeichnet worden ist. Ein

zweiter Punkt ist der, daß die Ansprüche der Bakterien nicht unwandelbar sind. Wir werden zum Schluß, wenn wir einen kurzen Blick auf Vererbungsfragen werfen, noch hören, daß Anpassungen an bestimmte Nährstoffe stattfinden können; auch jene Wasserbakterien, von denen wir eben sprachen, können allmählich an die Bewältigung größerer Stoffmengen gewöhnt werden. Eine Anpassungsfähigkeit an die Qualität sowohl als auch an die Quantität von Nährstoffen ist also nachweisbar. In weitgehendem Maße ist ferner die Assimilierbarkeit der Stoffe von äußeren Bedingungen abhängig, vom Luftzutritt, von der gleichzeitig vorhandenen Stickstoffquelle usw.; eine Kohlenstoffquelle, die allein unfähig ist, eine Art zu ernähren, kann dadurch tauglich werden, daß andere gleichzeitig geboten werden. Jeder dieser Stoffe übernimmt dann eben die Teilfunktionen des gesamten Lebengetriebes, denen er genügen kann.

Lehrreich ist das Verhalten eines Spaltpilzes bei Darbietung zweier (oder mehrerer) Nährstoffe, deren jeder auch allein ausreichen würde. Meist werden beide nicht gleichzeitig verarbeitet, der Spaltpilz wählt vielmehr je nach seiner Eigenart nach sonstigen Lebensbedingungen zwischen ihnen aus, er trifft eine „Elektion der organischen Nährstoffe". Das klassische Beispiel dafür ist dies, daß bei Darbietung von Rechts- und Linksweinsäure die Bakterien zuerst vorwiegend die Rechts-, dann erst die Linksweinsäure aufnehmen und verarbeiten, worin eine Methode zur Trennung beider gegeben ist; auch bei Darbietung verschiedener Mandelsäuren findet man solche Elektion. Bekannt ist ferner, daß Gelatine bei Gegenwart von Traubenzucker nicht verflüssigt oder später angegriffen wird, als beim Mangel dieses Kohlehydrats, sodann daß Harnstoff durch Traubenzucker gedeckt wird. Bacterium vulgare, in reinem Fleischwasser gezüchtet, zerstört in großem Umfang dessen Eiweißstoffe unter Ammoniakabspaltung und dadurch bedingter Alkalisierung der Lösung; fügt man Zucker hinzu, so werden die Eiweißkörper zum Teil geschützt und der Zucker unter Säuerung der Lösung verarbeitet. Wir haben hier gleichzeitig ein gutes Beispiel dafür, daß der Stoffwechsel nicht an feste Bahnen gekettet ist: werden nur die Eiweißkörper des Fleischwassers geboten, so müssen sie sowohl dem Aufbau wie der Lieferung von Energie dienen, bei Zuckergegenwart wird die Funktion der Energielieferung aber in erster Linie von diesem getragen, eine so weitgehende Zerlegung der Proteine, wie bei Zuckermangel, ist dann nicht erforderlich. Der Stoffwechsel, so sagt man, wird in jedem Einzelfall „regulatorisch" gelenkt und bald auf diese, bald auf jene Weise das Bedürfnis der lebenden Zelle befriedigt. Das Gegenstück zu den Elektionsversuchen liegt dann vor, wenn mehrere Bakterienarten gleichzeitig mit demselben Nährstoff in Mischkultur gefüttert werden. Dies ist das beste Mittel, um sich über das Zusammenwirken derselben in der freien Natur, wo Reinkulturen fehlen, eine Anschauung zu bilden, und es steht auch nichts dem Versuch entgegen, solchen Mischkulturen zweier oder mehrerer Bakterien gleichzeitig verschiedene Nährstoffe zu bieten, um die Kulturbedingungen den natürlichen noch mehr anzunähern. Entweder entwickelt sich ein Kampf, in dem die einen Arten unterliegen, oder es macht auch die eine Art der anderen erst bestimmte Stoffe zugänglich. Führen wir einer Mischkultur zweier Arten, von denen nur eine die Cellulose verarbeiten kann, dies Kohlehydrat als einzige Kohlenstoffquelle zu, so kann es vorkommen, daß beide sich gleichzeitig gleich kräftig entwickeln, indem die eine von den durch die andere gebildeten Zersetzungsprodukten der Cellulose lebt und jener irgendwelche Gegendienste leistet. Daß anaerobe Arten in Mischkultur mit aeroben durch diese vor dem Sauerstoff der Luft geschützt, Stoffe verarbeiten können, die sie sonst nur bei Sauerstoffabschluß verwerten können, ist endlich ein weiteres gutes Beispiel für günstige Beeinflussung einer Bakterienart durch eine andere. Findet gegenseitige günstige Beeinflussung statt, so würde man von Symbiose reden; interessante Beispiele dafür finden sich im Artikel über „Stickstoffbindende Bakterien".

In den meisten Fällen wird jedoch wie in der Kultur so auch in der Natur nicht eine gleichzeitige Entwickelung stattfinden sondern eine „Metabiose", indem zuerst die eine Art die Höhe der Entwickelung erreichen wird, um dann erst durch die andere mehr oder weniger plötzlich verdrängt zu werden.

3b) Dissimilation und Stoffabgabe. Gärungen. Die Betriebsenergie liefernden Dissimilationsvorgänge bestehen in Stoffzertrümmerungen, wobei die in diesen ruhende chemische Energie in Freiheit gesetzt und für die Lebenstätigkeit disponibel wird. Ueber den Dissimilationsstoffwechsel der Autotrophen haben wir auf S. 793 das Nötige schon gesagt, wir halten uns im folgenden an die Zerstörung organischer Stoffe im Stoffwechsel der Heterotrophen. Da haben wir zweierlei Arten zu unterscheiden, einmal diejenigen, welche durch Eingriff des Sauerstoffs erfolgen und als langsame Verbrennungen sich charakterisieren, sodann Zersetzungen, die ohne den Sauerstoff stattfinden. Diese können entweder in einfachen hydrolytischen Spaltungen organischer Stoffe, z. B. Zuckerarten,

bestehen oder auch in komplizierteren Zersetzungen, die derartig verlaufen, daß aus einem Stoff ein reduziertes und ein oxydiertes Produkt hervorgeht, Zertrümmerungen, die derart gedacht werden können, daß der Sauerstoff innerhalb des Moleküls des zerfallenden Stoffes wandert. Man faßt sie darum als intramolekulare Atmung zusammen. Weil bei dieser ein Teil des Stoffes unter Energieverbrauch reduziert werden muß, wird viel mehr Substanz bei der intramolekularen als bei der normalen Sauerstoffatmung zerstört werden müssen, damit derselbe Energiegewinn herauskommt; das ist einer der wesentlichsten Gründe, warum intramolekulare Atmungsvorgänge oft so großen Umfang annehmen. Der bekannteste, allerdings bei Bakterien nur wenig ausgeprägte Fall ist die alkoholische Gärung, bei der Zucker in Alkohol als reduziertes und Kohlensäure als oxydiertes Produkt zerfällt. Prinzipiell verlaufen die meisten Fälle bakterieller, unter Abwesenheit des freien Sauerstoffs vor sich gehender Dissimilationsprozesse ebenso; nur kann man nicht sagen, daß ein einziger Stoff in der besagten Weise zerfällt wird, muß sich vielmehr begnügen zu sagen, daß das zur Verfügung stehende Stoffgemisch unter Energiegewinn dergestalt zerlegt wird, daß mehr oder minder reduzierte und mehr oder minder oxydierte Produkte gebildet werden. Wir können das Ergebnis dieser Betrachtungen auch so fassen: Oxydationen finden statt auf Kosten von gebundenem Sauerstoff.

Wir können nun (vgl. S. 791) mit Rücksicht auf die Dissimilation die gesamten Bakterien in zwei große Gruppen einteilen, in diejenigen, deren Dissimilation lediglich in intramolekularer Atmung und analoger Stoffspaltung ohne freien Sauerstoff besteht; sie vermögen zwar geringe Mengen von freiem Sauerstoff, soweit sie solche vertragen können, ebenfalls in den Stoffwechsel zu ziehen, können aber auch ganz ohne solchen auskommen, das sind die anaeroben Bakterien, und in diejenigen, welche ebenfalls derartige ohne Eingriff des freien Sauerstoffs verlaufende Stoffzersetzungen unterhalten, aber außerdem zu ihrem Leben Verbrennungen unterhalten müssen, also bei gänzlichem Ausschluß von Sauerstoff nicht leben können, die sogenannten aeroben. Als dritte Gruppe unterscheiden wir die fakultativ anaeroben, welche sowohl bei Zutritt des Sauerstoffs gedeihen, als auch ohne solchen auszukommen vermögen.

Diese Einteilung ist, wie früher gesagt, ein Notbehelf, der aber beim heutigen Stand unserer Kenntnisse für ernährungsphysiologische Betrachtungen einigermaßen ausreicht.

Wenden wir uns nun den dissimilatorischen Stoffumwandlungen zu, so bestätigt uns schon die rohe Untersuchung des Gasaustausches das eben Gesagte. Aerobe Kulturen bringen Sauerstoff zum Verschwinden; an ausgehauchten Gasen finden wir sowohl total oxydierte Kohlensäure und Wasserdampf, daneben aber, bei anaeroben auch reduzierte, vor allem Wasserstoff und Methan, mit deren Entweichen den anaeroben ein beträchtlicher Besitz an chemischer Energie verloren geht, da sie dieselben nicht verbrennen können, sondern dies Gut anderen und zwar aeroben (wie wir sahen, autotrophen Bakterien) überlassen müssen. Die entweichenden Gasmengen sind oft recht bedeutend, vielfach, zumal bei anaeroben Kulturen, ohne weiteres dem bloßen Auge sichtbar. Viel untersucht ist zumal bei anderen Gewächsen das Verhältnis der ausgeatmeten Kohlensäure zu dem gleichzeitig aufgenommenen Sauerstoffquantum. Bei aeroben Bakterien hat sich gezeigt, daß dies gleich 1 sein kann, z. B. bei Azotobacter, der Kohlehydrate glatt zu Wasser und Kohlensäure verbrennt, dann ist dies Verhältnis auch zu erwarten. In vielen Fällen weicht es aber ab von 1, wird z. B. kleiner werden, wenn die Oxydationen nicht bis zur Aushauchung von Kohlensäure sondern nur bis zur Bildung von organischen Säuren führen, die zumal bei reichlicher Zuckerzufuhr und Verminderung der Zufuhr stickstoffhaltiger Nährstoffe in erheblicher Menge aufzutreten pflegen. Wenn ferner z. B. Sauerstoff gespeichert wird, wie wir das für manche farbstoffbildende Bakterien kennen gelernt haben, und die ausgehauchte Kohlensäuremenge gleich bleibt, so wird es ebenfalls kleiner werden; wenn dann nach einiger Zeit dieser gespeicherte Sauerstoff verwertet wird, so muß es wachsen.

Wir wollen jetzt die Umsetzungen, die einige wichtige Stoffe im aeroben und anaeroben Dissimilationsstoffwechsel erleiden, betrachten, ohne dabei zu vergessen, daß derartige Spaltungen und Oxydationen auch dazu berufen sind, Bausteine für den Abbau zu bilden.

Eine der wichtigsten Aufgaben der Bakterien im Haushalt der Natur, der Abbau der Eiweißkörper, wird an anderer Stelle (vgl. den Artikel „Fäulnis“) behandelt.

Die dissimilatorische Umwandlung anderer stickstoffhaltiger Stoffe verfolgen wir hier gleichfalls nicht im einzelnen. Bezüglich des Abbaues von Aminosäuren sei gesagt, daß aus Asparagin Ammoniak abgespalten und Asparaginsäure unter Bildung von Bernstein-, Essigsäure und Kohlensäure zerlegt wird, z. B. durch enzymatische Tätigkeit des Bacterium proteus.

Ein stickstoffhaltiger Gerüststoff von vielen Tieren und niederen Pflanzen, das Chitin, wird von bestimmten Bakterien

(Bacterium chitinovorum) verarbeitet unter Ammoniakabspaltung und genügt als einziger Kraft- und Baustoff.

Allbekannt ist die Vergärung des Harnstoffs durch die „Urobakterien", die nach der Gleichung verläuft

$$CON_2H_4 + 2H_2O = (NH_4)_2CO_3 + 7 \text{ Kal.}$$

eine Hydrolyse, die als energiespendender Vorgang anzusehen, vielleicht den Harnstoffbakterien aber auch dadurch von Bedeutung ist, daß durch die starke Alkalisierung des Substrats andere Bakterien unterdrückt werden. Die Fähigkeit zur Verseifung des Harnstoffs ist weit verbreitet und bald in höherem, bald in geringerem Maße ausgebildet. Als der energischste Zerstörer des Harnstoffs gilt Urobacillus Pasteurii. Aus Reinkulturen von Harnstoffbakterien kann das diesen Gärung bewirkende Enzym (Urease) dargestellt werden. Auch die Zerspaltung von Harn- und Hippursäure durch Bakterien ist Gegenstand der Forschung gewesen.

Gehen wir über zu den Kohlehydraten, so kommen wir zu dissimilatorisch ganz besonders wichtigen Stoffen, welche sowohl den aeroben als den anaeroben Spaltpilzen besonders häufig als bevorzugte Kraftquelle dienen. Die Aeroben oxydieren die verschiedensten Kohlehydrate entweder vollständig unter Bildung von Kohlensäure und Wasser, oder auch unvollkommen, dann entstehen organische Säuren der verschiedensten Art. Säurebildung aus Kohlehydraten, so sahen wir schon früher, ist eine der häufigsten Erscheinungen im Bakterienleben, und wenn Säurebildung sehr reichlich stattfindet, so spricht man von oxydativen Säuregärungen der Kohlehydrate (Glykosesäuregärung u. a.). Für uns sind aber besonders beachtenswert diejenigen Zerlegungen der Kohlehydrate, bei denen freier Sauerstoff nicht in der chemischen Gleichung erscheint. Wir stoßen hier auf die typischsten durch Bakterien erzeugten „Gärungen". Zuerst die Milchsäuregärung, rücksichtlich deren wir auf den Artikel „Milchsäuregärung" verweisen. Durch bestimmte Milchsäurebakterien (Bacterium lactis aerogenes) wird unter bestimmten Ernährungsbedingungen vorwiegend Essigsäure gebildet, man spricht in diesem Fall auch von anaerober Essigsäuregärung der Kohlehydrate ($C_6H_{12}O_6 = 3\,C_2H_4O_2$).

Während Milchsäuregärung durch Sauerstoffentzug gefördert wird, aber auch bei Sauerstoffzutritt vor sich gehen kann, ist die Buttersäuregärung an Sauerstoffabwesenheit gebunden; dieser Vorgang ist der erste biologische Prozeß, an dem man Lebenstätigkeit ohne Sauerstoffzutritt sicherstellte und auch die energetische Bedeutung solcher im luftfreien Raum vor sich gehender Zerspaltungen erkannte. Eine Gleichung der Buttersäuregärung, die von Milchsäure ausgeht, und annimmt, daß außer Butter- auch Propionsäure, Ameisensäure und Gase gebildet werden, lautet: $6C_3H_6O_3 = 2C_4H_8O_2 + 2C_3H_6O_2 + CH_2O_2 + 3CO_2 + 2H_2O + H_2 + 51$ Kal. Bei Buttersäuregärung der Zuckerarten würde noch der Energiegewinn hinzutreten, der bei der Milchsäuregärung des Zuckers erzielt wird.

Was die Verarbeitung von Polysacchariden anlangt, so wird Stärke von vielen Bakterien als Nahrung verwertet und zerlegt. Besonders augenfällig in seiner Bedeutung für den Stoffwechsel in der Natur ist die durch Mikroorganismen bewirkte Zerlegung der Cellulose, die jahraus jahrein in ungeheuren Mengen in Wald und Feld gebildet wird. Vgl. den Artikel „Gärung".

Auch die Pektinkörper, welche die Mittellamellen der Zellwände höherer Pflanzen bilden, werden von Mikroben, so auch von verschiedenen Bakterien zerlegt, die ihrerseits nicht die Befähigung haben, die Cellulose anzugreifen. So dient die Tätigkeit dieser Bakterien, welche die Zellen, z. B. Bastfasern, isolieren, aber nicht die Zellwände zerstören, bei der sogenannten Rotte des Hanfs und Leins auch dem Menschen. Es gibt Pektinvergärer, Buttersäurebildner, die Iogen speichern und bei der Sporenbildung ihre sonst stäbchenförmigen Zellen spindel- oder trommelschlägelartig anschwellen lassen (Bacillus pectinovorus). Auch andere Arten, wie Bacillus asterosporus, sind dazu befähigt.

Der Agar-Agar (Gelose, d. h. ein Gemenge von Polysacchariden, welche die Zellwände der Rotalgen aufbauen) verfällt gleichfalls bestimmten Bakterien, z. B. dem Bacterium gelaticum, einer Meeresbakterie, die wenigstens bestimmte Bestandteile des Agars hydrolysiert und für den Stoffwechsel im Meere wichtig ist. Neuerdings werden noch einige andere Arten beschrieben, die gleichfalls Agar lösen, während diese Befähigung den meisten Bakterien abgeht.

Nur kurz können wir darauf hinweisen, daß Gummiarten und verwandte Anhydride von Hexosen und Pentosen Bakterien zum Opfer fallen.

So sehen wir denn, wie die mannigfachsten Kohlehydrate dem Bakterienstoffwechsel zugänglich sind und unter Entstehung charakteristischer Produkte zerfallen (Butter-, Milchsäure u. v. a.). In bestimmten Fällen, in denen die Produktion eines Stoffes derart gesteigert wird, daß er ganz besonders auffällt, benennt man die betreffende Zersetzung nach ihm als Buttersäuregärung, Milchsäuregärung usw. Ganz scharfe Trennung von anderen Zer-

setzungen, in denen diese Produkte ebenfalls, nur nicht so reichlich entstehen, ist aber nicht möglich, unterscheiden sich die Erreger dieser Gärungen doch nicht durch eine den anderen Bakterien abgehende Befähigung, sondern nur dadurch, daß sie die Befähigung im besonders großen Maße besitzen.

Im Betriebsstoffwechsel der Bakterien werden vielfach Fette in Glyzerin und Fettsäure gespalten. Desgleichen sind Zersetzungen von Alkoholen häufig untersucht. An Oxydationen von Alkoholen seien zunächst erwähnt die Oxydation des Sorbits zu Sorbose und des Glyzerins zu Dioxyaceton durch Bacterium xylinum, des Mannits zu Fruktose durch Bacterium aceti. Am besten bekannt ist aber die Essigsäuregärung des Alkohols (vgl. den Artikel „Gärung").

Sehr wichtige Bau- und Betriebsstoffe sind auch die Fettsäuren, das geht schon daraus hervor, daß wir diesen in den obigen Auseinandersetzungen so häufig schon begegnet sind. Dieselben werden in der mannigfachsten Weise zerspalten oder unter Sauerstoffzutritt oxydiert. Wir ersparen uns auf Einzelheiten einzugehen.

Was die „Kinetik" der Dissimilationsvorgänge anlangt, so haben wir schon ausgeführt, daß es vielfach gelungen ist, sie als Folgen enzymatischer Wirkung darzustellen. Die Frage, ob und wieweit aerobe Atmungsvorgänge durch oxydierende Enzyme in Gang gesetzt werden, wollen wir hier gar nicht anschneiden, da nichts Sicheres darüber bekannt ist.

Während alle echten Dissimilationsvorgänge unter positiver Wärmetönung verlaufen, die Assimilationsvorgänge (die Bildung von organischer Substanz aus Kohlensäure und Wasser, die Bildung von Kohlehydraten aus Fettsäuren, die Bildung von Fett aus Kohlehydraten, die Entstehung der Aminosäuren aus den zugehörigen Fettsäuren, die Verkuppelung der Aminosäuren zu Peptiden und endlich zu Proteinen, um nur einige der wichtigsten mehr beiläufig zu nennen), aber unter Wärmebindung, gibt es nun einige Stoffumwandlungen, die zwar zu ihrer Einleitung der Energiezufuhr erheischen, gleichwohl aber in nahe Beziehungen zu Dissimilationsvorgängen stehen, die Denitrifikation und die Desulfuration.

Denitrifikation heißt die bei einer nicht geringen Zahl von heterotrophen Bakterien zu beobachtende Erscheinung, daß Nitrite oder Nitrate, oder beide unter Entbindung von Stickoxydul, Stickoxyd und Stickstoff vergast werden. Bakterien, welche nur Nitrite zerlegen, können bei Zufuhr von Nitraten nur dann denitrifizieren, wenn sie in Mischkultur mit irgend einem anderen Spaltpilz gezüchtet werden, der seinerseits Nitrate zu Nitriten reduziert, und diese Befähigung ist ganz außerordentlich weit verbreitet.

Die Reduktion von Nitraten zu Nitriten und die Entbindung von Stickoxydul, Stickoxyd und Stickstoff sind nun Vorgänge, die Energie binden, wie die folgenden Gleichungen, die unter der Voraussetzung, daß nur Stickstoff, kein Stickoxydul frei würde, aufgestellt sind:

$$HNO_3 + 184 \text{ Kal.} = HNO_2 + O$$
$$HNO_2 + 308 \text{ Kal.} = H + N + 2O.$$

Doch entsprechen dieselben der Wirklichkeit nicht, denn ganz abgesehen davon, daß nicht freie Säuren zerlegt werden, sondern Salze, wird der freie Sauerstoff, der auf der rechten Seite der Gleichung erscheint, tatsächlich aus den Kulturen nicht frei, sondern sogleich zu Oxydationszwecken verwendet. Und berechnet man nun, wieviel Energie bei der Oxydation der organischen Stoffe des Nährbodens (Zucker, Pentosen oder andere Kohlehydrate, organische Säuren, Alkohol, der für denitrifizierende Bakterien ein sehr guter Nährstoff ist) frei wird, so ergibt sich, daß hierdurch weit mehr Energie gewonnen als bei der Reduktion von Nitrat oder Nitrit gebunden wird ($C_6H_{12}O_6 + O_2 = 6CO_2 + 6H_2O + 668$ Kal.). Beide Vorgänge zusammen liefern also Energie und sind somit den Dissimilationsprozessen zuzuzählen. Dasselbe Ineinandergreifen von Reduktion und Oxydation, das für das Leben anderer Bakterien bei Sauerstoffentzug charakteristisch ist, findet sich auch hier, aber in fein säuberlicher Weise auseinandergelegt, insofern als die Reduktion anorganische, die Oxydation die organischen Stoffe des Nährbodens betrifft. Daß diese Erklärung der Denitrifikation als einer inneren Atmung zutrifft, wird unzweideutig dadurch bewiesen, daß manche denitrifizierenden Bakterien nur dann anaerob leben können, wenn ihnen Nitrate oder Nitrite zugeführt werden. Sonst ersticken sie ohne Luftzufuhr. Im übrigen sind die Beziehungen der denitrifizierenden Bakterien zum freien Sauerstoff noch nicht ganz klargestellt. Daß in natura jedenfalls durch Einschränkung der Lüftung Denitrifikation befördert werden kann, lehrt u. a. die Erfahrung der landwirtschaftlichen Bakteriologie, daß auf ein und demselben Ackerboden, auf welchem unter normalen Bedingungen keine Stickstoffentbindung zu beobachten ist, eine solche durch starke Bewässerung und dadurch bewirkte Hemmung des Sauerstoffzutritts hervorgerufen werden kann.

Ueber denitrifizierende Schwefelbakterien vgl. den Artikel „Bakterien. Schwefelbakterien".

Die biologisch gleiche Bedeutung besitzt nun zweifellos die Desulfuration, d. h. die

Reduktion von schwefelsauren Salzen. Diese wird durch anaerobe Spaltpilze, die den bei dieser Reduktion verfügbar werdenden Sauerstoff für Oxydationszwecke verwenden, durchgeführt.

Um die Güte einer Nährlösung zu ermitteln, kann man das Gewicht einer nach einer bestimmten Zeit gewachsenen Bakterienvegetation bestimmen und mit dem Gewicht einer bei anderer Ernährung erzielten Ernte vergleichen. Unter Einbeziehung der gleichzeitig erfolgten Dissimilation kann man sodann feststellen, wie groß die Ernte ist, die auf Kosten einer bestimmten Menge dissimilierter Stoffe gebildet wird: Man bestimmt nach abgelaufener Kulturdauer erstens das Gewicht der Ernte, zweitens das Gewicht des verbrauchten organischen Nährstoffes, um aus dem Verhältnis beider, dem sogenannten „ökonomischen Koeffizienten", zu ermitteln, ob die Bakterien mehr oder minder ökonomisch gearbeitet haben. Im allgemeinen zeigt sich, daß die Oekonomie um so größer, je günstiger die Lebensbedingungen sind. Sodann zeigen sich spezifische Differenzen. Die einen Bakterienarten müssen als ökonomischere Arbeiter als die anderen bezeichnet werden. Noch richtiger ist es, nicht Gewichtsmengen mit einander zu vergleichen, sondern Kalorien. Man bestimmt den Verbrennungswert (chemischen Energieinhalt), der in der Nährlösung ursprünglich vorhandenen Nährstoffe, der nach der Ernte noch übrig gebliebenen organischen Stoffe und endlich der Ernte selbst und kann auf solche Weise ermitteln, wieviel chemische Energie unter den betreffenden Kulturbedingungen frei gemacht werden mußte, um eine bestimmte Menge chemischer Energie in den organischen Stoffen der Ernte festzulegen. So hat man z. B. beim Bacterium proteus gefunden, daß die Ausnützung der Nährstoffe für Bauzwecke gering ist, wenn die Lösung zu stark alkalisch ist und dadurch die Lebensbedingungen verschlechtert werden. Auch Bacterium pyocyaneum arbeitet unter schlechten Lebensbedingungen weniger ökonomisch.

Auf gleiche Weise ist auch festgestellt worden, wie sich das Verhältnis der für Kraftzwecke verbrauchten stickstoffhaltigen zu den für gleiche Zwecke verbrauchten stickstofffreien Stoffen gestaltet; da hat sich denn gezeigt, daß echte Fäulniserreger, wie Bacterium proteus, mehr stickstoffhaltiges Material für Kraftzwecke verbrauchen als andere Arten, z. B. der Vibrio Finkler Prior. Ersterer charakterisiert sich also insofern als echter Erreger einer Eiweißfäulnis, als er Eiweiß nicht nur für Bau-, sondern auch für energetische Zwecke weitgehend verwendet, während es für die andere Art kennzeichnend ist, daß sie stickstoffhaltiges Material in erster Linie für Bauzwecke verwendet, und stickstofffreies Material als Energiequelle verwertet.

4. Produktion von Licht und Wärme. Die wesentlichste Form des Energiewechsels im Bakterienleben haben wir soeben bei Behandlung des Stoffwechsels schon kennen gelernt. Die Verwertung der Energie in Form chemischer Energie hat für die Bakterien wie für alle anderen Lebewesen den Vorteil, daß solche in sehr kompendiöser Form aufbewahrt und jederzeit ohne weiteres bei Bedarf aktiviert werden kann. Wir werfen nun noch einen Blick auf die Energie, welche als Wärme und als Licht die Bakterienzelle verläßt, nachdem sie, der Zerlegung von Stoffen mit chemischem Energieinhalt entstammend, vorher die mannigfachsten Arbeitsleistungen im Dienste der Zelle vollbracht haben mag. Zuerst die Produktion von Wärme. Bedingung dafür, daß man die auf Atmung und Gärungserscheinungen zurückzuführende Temperaturerhöhung nachweisen kann, ist eine Anordnung, daß die Wärme sich nicht sofort verteilen kann, also Ansammlung von Bakterienmassen in dichten Haufen, welche aus einem die Wärme schlecht leitenden Material bestehen, und das gleichzeitig für die Dissimilation geeignete Nährstoffe, Wasser usw. birgt. Solche Bedingungen sind bekanntlich gegeben in jenen Heu-, Laubhaufen usw., in denen durch die Tätigkeit der darin hausenden Bakterien und anderen Mikroorganismen die Temperatur ganz beträchtlich, bis auf 70° und mehr steigen kann, eine Steigerung, in der dann schließlich die „selbsterhitzten" Massen durch Austrocknung und durch schädliche Stoffwechselprodukte steril werden, auch in einen Zustand geraten können, in dem sie bei plötzlichem ungehindertem Sauerstoffzutritt sich entzünden (pyrophorer Zustand). Beim Zusammenschichten von Gras, lebenden Blättern usw. kann man beobachten, daß zuerst durch die Atmung dieser höheren Gewächse eine gewisse Temperaturerhöhung eintritt, daß dann nach dem Tod jener wieder ein Abfall sich geltend macht, bis durch die nun einsetzende Bakterientätigkeit wieder Steigerung eintritt, die bis zu den eben genannten hohen Wärmegraden fortschreiten kann. Daß diese Erwärmung auf Mikroben zurückgeht, ist zweifelsfrei dadurch zu beweisen, daß Sterilisierung sie verhindert. Anaerobe Dissimilationsprozesse reichen zur Erzielung einer so gewaltigen Erhitzung nicht aus, vielmehr wird sie durch Sauerstoffentzug verhindert. Eine leicht nachweisbare, wenngleich nicht so hochgehende Erwärmung kann man aber auch dann beobachten, wenn gärende Massen ohne Luftzutritt gehalten werden. Die durch Bakterientätigkeit bewirkte Temperaturerhöhung hat man übrigens auch im Kalorimeter gemessen.

Für die Bakterienwelt hat diese Erwärmung von Heuhaufen und ähnlichem Material insofern Bedeutung, als sie Standorte schafft für solche Bakterien unserer Breiten, welche hoher Temperaturen bedürfen. Davon später. Thermophile Tropenbakterien finden in dem Boden tags-

über während hinreichend langer Zeit die nötige Temperatur.

Produktion von Licht: Die „Leuchtbakterien" senden einen Teil der Energie, die ihre Zellen verläßt, als Lichtstrahlen aus. Ihr Licht hat ein kontinuierliches Spektrum von violett bis gelb und ist unter günstigen Bedingungen so stark, daß beispielsweise Keimlinge höherer Pflanzen sich nach ihm hinkrümmen können. Ein „Leuchtstoff" wird nicht ausgeschieden, nur die Zellen selbst leuchten; falls also die Lichtentwickelung durch einen bestimmten Stoff, die durchaus hypothetische „Luciferase", bewirkt wird, so ist dieser streng intracellular. Manche Leuchtbakterien können zwar auch ohne Sauerstoff leben, das Leuchten ist aber unbedingt an Sauerstoffzutritt gebunden und ist ein sehr feines in der bakteriologischen Technik auch verwendetes Reagens auf äußerst geringe Sauerstoffspuren. Die Leuchtbakterien sind großenteils Meeresbakterien, sind aber auch auf dem Festland weit verbreitet und finden sich vielfach auf Fleisch ein, das man mit 3% Kochsalzlösung übergießt und bei nicht zu hoher Temperatur hinstellt. Sie bedürfen zum Wachstum und Leuchten außer den Nährsalzen einen gewissen Salzgehalt des Substrates. Aus dem Süßwasser (Elbvibrio) sowie aus Kot isolierte Leuchtbakterien können solchen Salzzusatz entbehren. Mit Rücksicht auf die Ernährung sind sie recht anspruchsvolle Kohlenstoff-Peptonbakterien, wenigstens gilt das von den genauer untersuchten, andere sollen weniger anspruchsvoll sein. Züchtet man sie auf Peptonnährböden ohne besondere Kohlenstoffquelle, so können sie nicht leuchten, bringt man aber einen Tropfen einer Zuckerlösung hinzu, so erfolgt sofortiges Aufleuchten, ein Zeichen, daß Wachstum und Leuchten nicht Hand in Hand zu gehen brauchen; auch hat man beobachtet, daß das Leuchten verloren gehen kann und zwar auf die Dauer, ohne daß das Wachstum sonst irgendwie behindert würde. Eine interessante Methode des Nachweises von Enzymen bedient sich der Leuchtbakterien: Stärke ist als Kohlenstoffquelle nicht geeignet Leuchten zu bewirken, ist kein „Lichtnährstoff". Wenn gleichwohl Aufbringen von Stärkekleister auf Böden, die mit Leuchtbakterien beimpft sind, Aufleuchten zur Folge hat, so zeigt dies an, daß verzuckernde Enzyme im Nährboden vorhanden sein müssen, welche Stärke in den Lichtnährstoff Zucker verwandelt haben.

Da über die Mechanik des Wachstums der Bakterienzelle kaum etwas bekannt ist, wenden wir uns nun zur Frage nach dem Einfluß verschiedener Faktoren der Außenwelt auf das Bakterienwachstum und Bakterienleben.

5. Allgemeine Lebensbedingungen. Auf die Bakterien wirken die Lichtstrahlen und zwar zumal die blauen, violetten und ultravioletten schädlich, sobald sie eine hinreichende Intensität besitzen. Sauerstoffzutritt befördert die Schädigung. Agarnährböden, die vorher belichtet waren, erlauben nachträglich auch im Dunkeln kein so gutes Wachstum als solche, die gar nicht belichtet worden waren; das wird auf Bildung von Wasserstoffsuperoxyd unter dem Einfluß der Belichtung zurückgeführt. Bei hinreichend langer und kräftiger Einwirkung tötet das Licht die Bakterien, und zwar nicht nur vegetative Zellen, sondern auch Sporen. Bei mäßigerer Wirkung hemmt das Licht bloß das Wachstum ohne zu töten oder schädigt die Zellen in sonstiger Weise. Bei pathogenen wird die Virulenz herabgesetzt, bei farbstoffbindenden die Farbstoffbildung gehemmt; hierbei zeigt sich auch eine Nachwirkung, indem auch die Deszendenz beleuchteter Zellen, die im Dunkeln wachsen, gleichfalls eine Zeitlang keine Farbstoffbildung aufweisen. Durch gleichzeitige Anwesenheit fluoreszierender Farbstoffe (Eosin) kann die schädliche Wirkung der Lichtstrahlen vermehrt werden.

Die Wirkung von Radiumstrahlen auf Bakterien wurde untersucht mit wechselndem Erfolg, desgleichen die Wirkung von Röntgenstrahlen.

Abhängigkeit des Bakterienlebens von der Temperatur: Die Lebenstätigkeit der Bakterien spielt sich etwa zwischen den Temperaturgrenzen 0° und 70° ab, doch gilt das nur für die Bakterien in ihrer Gesamtheit; bei den einzelnen Arten sind die Grenzen viel näher gerückt und die Lebenstätigkeit vieler Arten ist z. B. zwischen die Grenzen 3 und 45° eingeschlossen. Da man bei den verschiedenen Arten äußerst verschiedene Ansprüche findet, muß man mit Rücksicht auf diese Ansprüche zur besseren Uebersicht die Bakterien in mehrere Gruppen unterbringen. Von medizinischer Seite stammt der Vorschlag drei Gruppen zu bilden, die Psychrophilen (0 bis 30°), die Mesophilen (10 bis 45°) und die Thermophilen (40 bis 70°). Etwas anders lautet eine von botanischer Seite vorgeschlagene Einteilung, die wir hier genauer wiedergeben wollen.

Man zieht eine Grenze bei 25° (Zimmertemperatur) und nennt alle Bakterien, die bei 25° nicht mehr wachsen, sondern nur bei höherer Temperatur, thermophil. Liegt deren Maximum sehr hoch, bei 60 bis 70°, so redet man von Orthothermophilen. Liegt das Maximum zwar hoch, etwa bei 50°, findet aber bei niederer Temperatur besseres Wachstum statt, so spricht man von thermotoleranten Arten. Liegt das Optimum hoch, findet aber auch bei niederer Temperatur noch Wachstum statt, so nennt man die

Arten psychrotolerant. Liegt das Maximum relativ tief, höchstens bei 35°, so hat man psychrophile Formen vor sich und aus diesen hebt man als orthopsychrophil die heraus, die bei recht niederer Temperatur besonders gut gedeihen. Orthothermophil wäre hiernach Bacillus calfactor, der sich in bakteriell erhitzten Heuhaufen findet, sobald die Temperatur beginnt, 40° zu übersteigen und der dann die Temperatur bis auf 70° hinauftreibt. Thermophil wäre z. B. der Tuberkuloseerreger oder der Influenzabazillus, dessen Minimum bei 25° liegt. Thermotolerant sind Bacillus subtilis, vulgatus. Psychrotolerant wären die meisten pathogenen Arten, Bacillus anthracis, typhi u. a. Psychrophil wären Bacterium fluorescens, coli, mycoides u. a. und endlich orthopsychrophil Bacterium phosphoreum. Die genannten Zahlen beziehen sich auf das Wachstum durch Zellteilung. Andere Funktionen der lebenden Bakterienzelle haben teilweise andere Temperaturgrenzen. Die Sporenbildung scheint stets in engere Grenzen eingeschlossen zu sein, als die Zellteilung.

Durch Züchtung bei hoher Temperatur, die sich zu weit vom Optimum entfernt, kann man asporogene Rassen erhalten, die die Fähigkeit zur Sporenbildung erst nach einiger Zeit der Kultur bei günstiger Temperatur wieder erhalten. Häufig beschrieben ist die Erscheinung, daß Essigbakterien durch Kultur bei supraoptimaler Temperatur Involutionsformen (S. 802) bilden. Die Giftigkeit pathogener Formen wird ferner durch Ungunst der Temperaturbedingungen abgeschwächt oder vernichtet, desgleichen vielfach die Farbstoffproduktion chromoparer Arten (so des Bacterium der blutenden Hostie). Das chromophore Spirillum rubrum wird auch durch Zucht bei seinem Maximum, 39° des Farbstoffs nicht beraubt. Die genannten Zahlen sind nicht allzu genau zu nehmen, da sich die Temperaturgrenzen stark mit den sonstigen Bedingungen verschieben können: der Choleravibrio gedeiht auf Kartoffeln nur bei erhöhter Temperatur gut, auf Gelatine aber auch bei niedriger. Gewisse Orthothermophile gedeihen im Erdboden bei viel geringerer Temperatur als auf künstlichen Nährböden. Viel untersucht ist auch das Gebiet der „Anpassungserscheinungen“ an höhere Temperatur, besonders auch rücksichtlich der Farbstoffbildung und der Erfolg auch dieser Studien warnt davor, die Temperaturgrenzen als allzufeste zu betrachten. Beim Anthraxbacillus gelingt es, durch allmähliche Angewöhnung die untere Grenze von 14 auf 10° herabzusetzen.

Tötung durch extreme Temperaturen. Extrem tiefe Temperaturen sind ohne wesentliche Bedeutung; sie werden von den Bakterien ertragen und bewirken höchstens geringe Schädigung. Um so wichtiger ist die Tötung durch hohe Temperaturen, die bekanntlich auch von größter praktischer Bedeutung für den menschlichen Haushalt ist.

Vegetative Zellen werden schon durch ziemlich niedrige Temperaturen getötet, genaue Zahlenangaben sind schwer zu machen, da die Tötungszeit natürlich in Frage kommt und auch das Medium, in dem die Zellen erhitzt werden. Dienen saure Lösungen als Medien während der Erhitzung, so genügen schon geringere Temperaturen, um tödliche Wirkung zu haben, als wenn die Zellen in neutralen, unschädlichen Lösungen suspendiert werden. Es findet sich angegeben, daß die Zellen psychrophiler Arten im feuchten Zustand durch eine Temperatur von 37°, die von mesophilen durch 60° und die der thermophilen erst durch 75° abgetötet werden. Vegetative Zellen des Bacillus subtilis werden durch eine Temperatur von 55° in kurzer Zeit getötet.

Viel widerstandsfähiger sind, wie männiglich weiß, die Sporen, auch diese zumal im trockenen Zustand. Feuchte Anthraxsporen, welche Erhitzen auf 70° stundenlang ertragen, gehen in Wasserdampf von 100° nach 10 Minuten zugrunde. Im trockenen Zustand vertragen sie Erhitzen auf 100° viele Stunden lang.

Sporen von Bacillus vulgatus, mesentericus und mycoides, und zwar selbst solche, die während 23 Jahren im trockenen Zustand aufgehoben worden waren, wurden durch trockene Hitze von 120 bis 130°, die während einer halben Stunde einwirkte, nicht geschädigt, sondern erst durch einhalbstündiges Erhitzen auf 145° getötet.

Wir kommen zur Besprechung der chemischen Beeinflussung der Bakterien durch die Außenwelt, soweit diese Frage nicht bereits bei der Behandlung des Stoffwechsels erledigt ist. Was zunächst den Wassergehalt der Umgebung angeht, so finden wir auch bei den Bakterien die mannigfachsten Abstufungen in den Ansprüchen und im Anpassungsvermögen. Auf den üblichen Agarnährböden der Mediziner stockt das Wachstum durchschnittlich dann, wenn weniger als 60% Wasser zugegen ist. Während Bacterium coli bei Gegenwart von 7 bis 10% Kochsalz nicht mehr wächst, vertragen andere Formen noch bis 25% Ob eine Art auf so salzreichen Böden wachsen kann oder nicht, hängt in erster Linie davon ab, ob sie imstande ist, die nötigen Turgorstoffe in ihrem Zellinnern zu bilden bezw. aufzustapeln, um den osmotischen Druck des Substrates zu überwinden, nebenbei macht sich aber natürlich auch die chemische Qualität der Salze geltend und wir hörten früher, daß oft Salzmischungen bei gleicher osmotischer Leis-

tung besser vertragen werden, als Lösungen eines einzigen Salzes. Neben dem Gros der Bakterien, bei denen wir die Frage stellen müssen, einen wie hohen osmotischen Druck sie vertragen können, gibt es dann noch andere, die einen gewissen osmotischen Druck nötig haben, um leben zu können, als solche haben wir schon früher die Meeresbakterien und insonderheit die Leuchtbakterien kennen gelernt. Anpassungserscheinungen an stärkere und schwächere Lösungen sind vielfach zu konstatieren. Sinkt der Wassergehalt unter die Grenze, unterhalb deren Wachstum möglich ist, und trocknet endlich das Substrat vollständig aus, so trocknen damit auch die Bakterienzellen ein. Viele können auf solche Weise sehr lange aushalten, um bei Befeuchtung des Substrats wieder zu erwachen, andere sterben bald. Abgesehen von der hygienischen Seite dieser Frage ist die Frage der Widerstandsfähigkeit trockener Bakterien besonders in bakteriengeographischer Beziehung von großer Bedeutung, wie ohne weiteres einleuchtet. Im Gegensatz zu den vegetativen Zellen stehen die Sporen. Diese sind, soviel man weiß, durch Austrocknen schier überhaupt nicht zu töten, und bleiben z. B. nach vieljährigem Aufenthalt in trockener Luft noch keimfähig. Möglich ist allerdings, daß weitere Forschungen auch hier noch spezifische Unterschiede aufdecken werden.

Die Frage, wielange Zeit Bakterien im trockenen Zustand lebend bleiben, ist übrigens ganz und gar von begleitenden Umständen abhängig, von der Frage, in welchem Substrat sie eintrockneten, ob das Eintrocknen langsam oder schnell erfolgte usw. und nicht zu letzt davon, ob auch die letzten Wasserspuren, etwa im Exsikkator, entzogen werden oder nicht.

Was die Beeinflussung des Bakterienlebens durch Gase betrifft, so verweisen wir mit Rücksicht auf den Sauerstoff auf Seite 791, kurz sei sodann erwähnt, daß Wasserstoff und Stickstoff (der letztere, wenn wir von stickstoffbindenden Bakterien absehen) sogenannte indifferente Gase sind, d. h. sie schaden, wenn überhaupt, lediglich durch Verdrängung des Sauerstoffs. Die Kohlensäure ist in höherer Konzentration für manche Bakterien ebenfalls indifferent, für andere giftig.

Schreiten wir weiter in der Besprechung der chemischen Beeinflussung des Bakterienlebens, so laufen wir Gefahr, in ein uferloses Meer zu geraten. Besonders beachtenswert sind auf diesem Gebiet die sogenannten Chemomorphosen, Beeinflussungen der Gestalt durch die Einwirkung bestimmter Stoffe oder Stoffkombinationen. Durch bestimmte Einflüsse können Bakterien, die sonst langgestreckte Stäbchen darstellen, kokkenartige Gestalt annehmen, andere, die gewöhnlich in Form von Zellfäden wachsen, können dazu gebracht werden, als Einzelindividuen zu erscheinen usw. Durch Gegenwart bestimmter Stoffe können Spaltpilze, die sonst ohne Gallerthülle zu wachsen pflegen, eine solche ausbilden; man hat derselben wohl in diesem Falle auch eine Schutzfunktion gegen Schädigung durch diese Stoffe zugeschrieben, und umgekehrt fehlt unter dem Einfluß bestimmter Stoffe manchen Formen die Gallerthülle, die sonst für sie charakteristisch ist. Solche teratologischen Erscheinungen, wie man sie genannt hat, können durch die verschiedensten Stoffe (Lithiumsalze, Alkaloide u. a. m.), ferner auch durch Abweichung der chemischen Reaktion usw., auch durch die Zufuhr bestimmter Nährstoffe erzielt werden. Zu den wichtigsten Chemomorphosen gehört die Beeinflussung und Umsteuerung des normalen Entwickelungsganges unter dem Einfluß der chemischen Veränderung des Nährbodens. Beginnen die Ernährungsbedingungen sich zu verschlechtern, sei es durch eintretenden Nahrungsmangel, sei es durch Anhäufung ungünstiger Stoffwechselprodukte, so wird das Wachstum stocken und die Zelle wird in Dauerzustand übergehen. Auf solche Weise wird die Sporenbildung bei den dazu befähigten Bakterien ausgelöst. Bedingung für derartige Auslösung der Sporenbildung ist es im allgemeinen, daß die Bakterien vorher gut ernährt waren. Daß luftscheue Arten durch zu reichlichen Sauerstoffzutritt zur Sporenbildung veranlaßt werden, haben wir schon gehört; übrigens kann auch bei diesen Nahrungsentzug zum gleichen Erfolg führen.

Chemomorphosen, die direkt Ausdruck einer Schädigung sind, hat man auch als Involutionsformen bezeichnet, solchen sind wir schon bei der Besprechung der Temperatur begegnet; sie sind oft, aber nicht immer, Vorläufer des Todes und bestehen in krankhaften Aufblähungen oder sonstigen Gestaltabweichungen.

Wir betreten nun ein großes Sondergebiet der Lehre von der chemischen Beeinflussung der Bakterien, das Gebiet, das die Giftwirkungen behandelt, d. h. die Wirkung solcher Stoffe, die schon in verhältnismäßig geringer Konzentration schädlich oder tödlich wirken.

Wenn wir von der medizinischen Literatur, die bekanntlich im weitgehendsten Maße Giftwirkungen untersucht, absehen, so beginnt man erst neuerdings die Rolle von Giftstoffen, die von den Bakterien selbst gebildet werden, eingehender zu studieren; sie sind ihnen eine wichtige Waffe im Kampf ums Dasein, eine Waffe, die sich allerdings offenbar auch gegen ihre eigenen Erzeuger kehren kann, und wenn

wir sehen, wie bei der Fäulnis und anderen Stoffzersetzungen die einen Bakterienarten zuerst in überwiegender Menge auftreten, um über kurz oder lang durch andere abgelöst zu werden, so ist das, abgesehen von anderweitigen Veränderungen der Lebensbedingungen, wesentlich die Folge der Wirkung von Stoffwechselprodukten. Man kann die giftigen Stoffwechselprodukte als isantagonistisch oder als heterantagonistisch unterscheiden, im ersteren Fall wenden sie sich, wie der Name sagt, gegen die eigenen Erzeuger, im anderen gegen andere Bakterien. Ob das eine oder andere geschieht, wird ganz wesentlich auch von sonstigen Bedingungen abhängen, zumal von der Konzentration der Giftstoffe. Wissen wir doch, daß Gifte in geringen Spuren anregend auf die Lebenstätigkeit wirken. Die Frage, ob ein Stoff schädlich oder nützlich, ob er isantagonistisch oder heterantagonistisch wirkt, hat also bloß Sinn, wenn seine Konzentration und die Wirkungsbedingungen mit angegeben werden. Das spezifisch verschiedene Verhalten gegen dieselben Gifte lehrt sodann die Wirkung der Gärungsprodukte, von denen wir wissen, daß sie in geringen Konzentrationen Feinde der Gärungserreger aus dem Feld schlagen, in stärkeren aber auch die Gärungserreger selbst schädigen. Ueber die chemische Natur dieser Gifte, die wahrscheinlich die denkbar mannigfaltigste je nach Erzeuger und Erzeugungsbedingungen ist, wissen wir fast noch gar nichts, wenn wir von den Gärprodukten im engeren Sinn absehen. Häufig genannt wird u. a. die Pyocyanase, ein kochfestes Produkt des Bacterium pyocyaneum.

Schier noch größer als die Literatur über Giftstoffe, welche die Bakterien selbst bilden, ist die Literatur, die über Wirkung solcher Gifte handelt, die der Mensch im Laboratorium oder auch in seinem Haushalt auf die Bakterien wirken läßt. —

Ein Einfluß der Schwerkraft auf das Wachstum der Bakterien hat nicht nachgewiesen werden können.

Die Beeinflussung der Bakterien durch mechanischen Druck ist zweifellos ein sehr geringer, Schädigungen, die man beobachtet hat, dürften auf Rechnung der durch den Druck gesteigerten Sauerstoffkonzentration oder auf ähnliche Weise zu erklären sein. Elektrische Ströme wirken infolge der Elektrolyse, d. h. rein chemisch auf das Bakterienwachstum ein.

6. Freie Ortsbewegung. In einigen Purpurbakterien, die im Wasser schweben oder auf der Oberfläche des Wassers eine sogenannte „Wasserblüte" bilden, findet man in den Zellen eigenartig gestaltete, das Licht stark brechende Körperchen, die die Zellen leichter machen als Wasser und so das Schweben ermöglichen. Früher nannte man sie Gasvakuolen; heute nennt man sie Schwebekörper (Airosomen). Woraus sie bestehen, ist unbekannt. Verschließt man das Gefäß, in dem sich solche mit Airosomen versehene Purpurbakterien befinden, mit einem Kork, und übt man einen Druck auf den Kork aus, so sinken sie alsbald zu Boden und das Mikroskop zeigt, daß die Airosomen nun verschwunden sind.

Wir wenden uns den Ortsbewegungen zu, welche direkt von der Lebenstätigkeit des Protoplasmas abhängen. Da haben wir einmal Kriech- oder Gleitbewegungen, zum anderen Mal Schwimmbewegung durch Geißeln. Die Mechanik der ersteren, die übrigens nur bei Beggiatoen, Thiothrix, Myxobakterien vorkommen, ist noch unbekannt, die Zellen oder Zellfäden kriechen dabei unter Benützung einer Unterlage mit (oder ohne?) Drehung um die Längsachse vorwärts. Der vordere Teil der Zellfäden kann sich dabei vom Substrat abheben und einen Kegelmantel beschreiben (sogenannte Pendelbewegungen). Die oft sehr auffälligen Krümmungen, die die Fäden der Beggiatoen ausführen, sind nicht Folge eigener Krümmungsfähigkeit, werden ihnen vielmehr durch Sandkörnchen und andere Partikelchen des Substrats aufgezwungen.

Die den echten Bakterien, soweit sie bewegliche Entwickelungsstadien haben eigene Schwimmbewegung, ist auf Geißeltätigkeit zurückzuführen. Diese Geißeln sind protoplasmatische Organe, die zweifelsohne auch in den Fällen, in welchen man über die Anheftungsweise nichts wahrnehmen kann, vom Protoplasma entspringen, und die Zellhaut durchsetzen.

In bestimmten Fällen (Spirillum volutans) hat man im Innern der Zelle in der Nähe der Insertionsstelle der Geißeln ein Organ in Form eines kleinen körnigen Gebildes beobachtet, das als eine Art von Bewegungszentrum, gleich dem „Blepharoplasten" der Flagellaten gedeutet wird. Das koordinierte Zusammenarbeiten mehrerer Zellen, welches bei der Bewegung von fädigen oder anders gestalteten Kolonien nötig ist, wird offenbar durch Plasmadesmen (Protoplasmaverbindungen) zwischen den Zellen ermöglicht. Unregelmäßige Purzelbewegungen, welche bewegliche Sarcinapakete nicht selten zeigen, deuten auf gelegentliche Störungen dieser koordinierten Bewegungstätigkeit hin.

Form und Funktion der Geißeln ist neuerdings unter Benutzung der Dunkelfeldbeleuchtung eingehend studiert worden. Wo Geißelschöpfe vorhanden sind, sind die einzelnen Geißeln derselben während der Bewegung zu einer einheitlichen Geißel,

einem sogenannten „Zopf“ verklebt; das gilt nicht nur für die Spirillen, sondern wahrscheinlich auch für die lateral begeißelten Stäbchen, die also während der Bewegung eine ganze Zahl solcher Zöpfe, die gleichsinnig arbeiten, an den Längswänden führen. Diese Geißelzöpfe sind nun bei der Bewegung bei stäbchenförmigen Bakterien und Spirillen stets nach rückwärts gerichtet. Umkehr der Bewegungsrichtung erfolgt dadurch, daß sich die Zöpfe nach rückwärts schlagen und nunmehr der bis dahin vordere Zellpol zum hinteren wird. In diesen Fällen treiben also die Geißeln den Bakterienleib vor sich her, wie die Schraube den Dampfer. Anders die Geißeln der Vibrionen. Sie sind derber als die der anderen Bakterien, und während der Ruhe wie während der Bewegung stets vom Körper abgewandt. Sitzt also am vorderen Pol eine Geißel während der Bewegung, so windet sie sich nicht um die Zelle, sondern schaut mit ihrer Spitze nach vorn, schleppt somit die Zelle hinter sich her. Was die Form der Geißeln bezw. Zöpfe angeht, so stellen sie, auch im Ruhezustand, eine rechtsläufige Schraube vor (rechts im Sinne des Mechanikers). Bei der Bewegung „umlaufen die schraubenförmigen Kontraktionslinien die Geißel ebenfalls rechts herum“, der Bakterienkörper wird dadurch in eine linksherum rotierende und gleichzeitig vorwärts gerichtete Bewegung versetzt. Der Körperbau der Spirillen und Vibrionen ist dieser Form der Vorwärtsbewegung angepaßt, denn deren Zellen sind stets links gewunden. Bei den Stäbchen ist schon infolge des Vorhandenseins vieler Geißelzöpfe die Bewegungsweise komplizierter. Besteht sie auch hier im wesentlichen in einer unter Linkstorsion des Körpers verlaufenden Vorwärtsbewegung, so tritt meist hinzu die sogenannte Trichterbewegung, indem die Zellen nach beiden Seiten hin von der Bahn der geradlinigen Vorwärtsbewegung abweichen. Diese ist um so stärker, je langsamer sich die Bakterien, sei es infolge spezifischer Trägheit, sei es infolge äußerer Hemmung vorwärtsbewegen, und tritt zumal kurz vor dem Aufhören der Bewegung deutlich in die Erscheinung. Es ist noch hinzuzufügen, daß die Geißeln um so flacher gewunden sind, je schneller die Bewegung ist, in der Ruhe sind sie am steilsten und daß die Geißelgestalt insofern von der regelrechten Schraubenform etwas abweicht, als die Geißel statt auf einen Zylinder auf einen stumpfen Kegel aufgerollt zu denken ist.

Protoplasmaströmungen im Innern der Bakterienzelle hat man bisher nur in einem einzigen Fall, bei Bacillus Bütschlii beobachtet.

Einfluß innerer und äußerer Bedingungen auf die Schwimmbewegung der Bakterien: Soweit innere Ursachen in Betracht kommen, ist daran zu erinnern, daß bewegliche Bakterien nicht in allen Entwickelungsstadien diese Befähigung zur Schau tragen. Die Keimstäbchen tragen oft keine Geißeln und Fadenbakterien, wie Cladothrix, sind nur im Schwärmstadium beweglich. Bacillus subtilis u. a. verliert die Beweglichkeit, wenn er sich dazu anschickt, eine Kahmhaut und Sporen auszubilden, andere Arten (Anaerobier) schleppen ihre fertigen Sporen eine Zeitlang in sich umher. Hierbei spielen allerdings neben inneren schon äußere Ursachen mit insofern als die Sporenbildung wie auch die Schwärmtätigkeit durch den Wechsel der Lebensbedingungen ausgelöst wird. Die Zellteilung beweglicher Bakterien findet während der Bewegung statt.

Wenden wir uns nun den Außenbedingungen zu, so liegen eine Anzahl von Beobachtungen vor, denen zufolge durch bestimmte Ernährungseinflüsse die Beweglichkeit genommen und wiedergegeben werden kann, so bei Bacillus amylobacter.

Für unbewegliche Kokken liegt die noch zu bestätigende Behauptung vor, daß man sie durch stetes Ueberimpfen auf neue Böden von derselben Zusammensetzung im beweglichen Zustand erhalten könne. In allen diesen Fällen werden, falls unbewegliche Stadien vorliegen, Geißeln überhaupt nicht gebildet; in anderen Fällen aber können geißeltragende Bakterien „starr“ gemacht werden, d. h. die Geißeln sind dann im aktionsunfähigen Zustand, so z. B. beim Heubacillus durch starkes Salzen der Böden. Bei Purpurbakterien kann Verdunkelung „Dunkelstarre“ auslösen. In anderen Fällen kann der Erfolg durch ungünstige Temperaturbedingungen erzielt werden. Besonders genau ist in dieser Richtung der Bacillus calfactor untersucht worden.

Die Schnelligkeit der Bewegung ist begreiflicherweise ebenfalls von der Höhe der Temperatur abhängig, aber abgesehen davon auch von spezifischen Unterschieden.

Interessant sind die Beziehungen zwischen Beweglichkeit und Sauerstoffzutritt, die natürlich je nachdem luftscheue oder luftliebende Formen vorliegen, verschieden sind. Bei anaeroben Formen erlischt die Bewegung infolge der Durchlüftung des Mediums, bei aeroben umgekehrt bei Luftentzug nach einiger Zeit. Fakultativ anaerobe Bakterien stellen bei Sauerstoffentzug ihre Bewegung über kurz oder lang ein, bei Zufuhr von Nahrung erst nach längerer Zeit als in Wasser.

Haben wir soeben Fälle besprochen, in denen die Bakterien im „homogenen Medium“ sich befanden, bei welchen also die Faktoren der Außenwelt allseitig in

qualitativ wie quantitativ identischer Weise auf die Zellen einwirkten, so müßten sich anschließen diejenigen Bewegungserscheinungen, die ausgelöst werden, wenn die Reize ein Konzentrationsgefälle besitzen, so daß die Beweglichkeit den Bakterien erlaubt, in diesem Gefälle Orte einer bestimmten Konzentration aufzusuchen. Es sind das sogenannte taktische Reizerscheinungen.

7. Variabilität und Erblichkeit. Die große Bedeutung, welche die Bakterien für den Kreislauf der Stoffe auf Erden haben, wird uns erst dann voll verständlich, wenn wir noch auf eine bei ihnen besonders stark ausgeprägte Befähigung hinweisen, für welche wir im obigen bereits eine ganze Zahl von Beispielen gebracht haben: die Variabilität der physiologischen Eigenschaften, die große Plastizität, die der Stoffwechsel der meisten Arten zeigt, der sich je nach den obwaltenden Ernährungsbedingungen in diesen oder jenen Bahnen bewegen kann; die Befähigung ferner, unter dem Einfluß bestimmter extremer Außenbedingungen die Kardinalpunkte dieser Außenbedingungen zumal Minimum und Maximum derart zu verschieben, daß die Spannweite innerhalb deren sich das Leben abspielen kann, erweitert wird. Die physiologische Variabilität der Bakterien ist häufig dargestellt worden und wir können sie hier nicht eingehend behandeln, wollen aber doch auf eine Tatsache hinweisen, die vielleicht für die ganze Erblichkeits- und Entwickelungslehre weit über die Grenzen der Bakteriologie hinaus Bedeutung erlangen könnte.

Wir gehen aus von der Erfahrungstatsache, daß Bakterien durch experimentelle Eingriffe neue Befähigungen annehmen oder auch bestimmte vorhandene verlieren können. So können sie bei allmählicher Angewöhnung die Eigenschaft erwerben, bei höherer Temperatur als zuvor, zu wachsen, oder sie verlieren beispielsweise bei Zucht unter bestimmten ungünstigen Bedingungen die Befähigung zur Sporenbildung, die ihnen normalerweise eignet. Derartige Veränderungen werden nun für gewöhnlich über kurz oder lang wieder rückgängig gemacht, wenn die Arten wieder unter normalen Bedingungen kultiviert werden, der Faktor also verschwindet, der sie ausgelöst hatte, man spricht dann von „Modifikationen“ einer Art, die nicht auf die Dauer erblich erhalten bleiben. Solche Modifikationen können manchmal auch dann wieder verschwinden, wenngleich die auslösenden Bedingungen bestehen bleiben. Einige experimentell hervorgerufene Veränderungen haben jedoch die Eigentümlichkeit, daß sie als unveräußerliches Gut auf die Nachkommen vererbt werden und bei diesen erhalten bleiben, auch wenn jene experimentellen Eingriffe verschwinden, und die Weiterzucht unter ganz normalen Bedingungen erfolgt. Derartige erbliche Abänderungen können in einem „Fortschritt“ bestehen, wenn wir als Fortschritt solche Veränderungen bezeichnen, die das Rüstzeug im Kampf ums Dasein vermehren. Wir begnügen uns damit, einen Fall zu beschreiben: In der Bakteriologie muß man vielfach zur Artcharakterisierung physiologische Unterscheidungsmerkmale mit heranziehen und zur Unterscheidung z. B. die Frage mit berücksichtigen, welche Gasgemische unter bestimmten Bedingungen gebildet werden, welche Kohlenstoffquellen die einzelnen Arten zu verarbeiten vermögen usf. Zur Unterscheidung von Typhusbakterien von dem gestaltlich kaum zu unterscheidenden Bacterium coli kann beispielsweise das Merkmal dienen, daß Bacterium coli im Gegensatz zum Typhusbakterium Milchzucker verarbeiten kann. Nun hat man einen Bacterium coli-ähnlichen Spaltpilz gefunden, der den Milchzucker nicht, wie das echte Bacterium coli, sofort anzugreifen vermochte; erst wenn er eine Zeitlang auf milchzuckerhaltigen Böden gezüchtet wird, erwirbt er die Befähigung dazu, und zwar die einzelnen Individuen in einer Kultur ungleich schnell und die Zucht auf solchen Böden ist auch die einzige Methode, ihm diese Befähigung zu verschaffen. Impft man nun dessen Deszendenten auf beliebige Böden über, so verlieren sie die Befähigung zur Milchzuckerzersetzung nicht wieder, auch wenn sie hinfort beliebig lange Zeit auf milchzuckerfreien Böden weiter gezüchtet werden; denn werden sie von solchen nunmehr auf Milchzuckerböden übertragen, so bedürfen sie nicht erst der Anpassung an diese, sondern zersetzen das genannte Kohlehydrat sofort. Es wird also eine nützliche Befähigung einer Spezies künstlich beigebracht und diese Befähigung dann konstant weiter vererbt. Aehnliche Erscheinungen, z. B. Vererbung der experimentell beigebrachten Befähigung Rohrzucker zu zerlegen, Vererbung einer durch Giftzusatz erworbenen Aenderung in der Farbstoffbildung, die sofort konstant weiter vererbt wird, sind auch sonst nachgewiesen worden. Man hat solche Veränderungen im Gegensatz zu Modifikationen als Mutationen bezeichnet, im Hinblick auf jene plötzlich auftretenden und sich konstant vererbenden Veränderungen die ein Prozentsatz der Deszendenz höherer Pflanzen zeigen kann und die mit diesem Namen belegt werden.

Von den Mutationen höherer Pflanzen unterscheiden sich die Bakterienmutationen dadurch, daß jene bisher nicht künstlich hervorgerufen werden können und auch keine

„Anpassungen" an bestimmte Bedingungen der Außenwelt darstellen. Insofern sind jene Entdeckungen von Bakterienmutationen sicher ein wissenschaftlicher Fortschritt, vielleicht sind sie berufen, späterhin die experimentelle „Vererbungslehre" der Bakterien zu einer experimentellen „Entwickelungslehre" derselben umzugestalten.

Literatur. *Zentralblatt für Bakteriologie und Parasitenkunde, 2. Abt., Jena 1895 bis 1911 u. f.* — **Friedrich Czapek**, *Biochemie der Pflanzen, Jena 1905.* — **H. Euler**, *Grundlagen und Ergebnisse der Pflanzenchemie, Braunschweig 1908 und 1909.* — **Alfred Fischer**, *Vorlesungen über Bakterien, 2. Aufl., Jena 1903.* — **Ludwig Jost**, *Vorlesungen über Pflanzenphysiologie, 2. Aufl., Jena 1908.* — **Alfred Koch**, *Jahresbericht über die Fortschritte in der Lehre von den Gärungsorganismen, Leipzig 1890 bis 1908 u. f.* — **Walter Kruse**, *Allgemeine Mikrobiologie, Leipzig 1910.* — **K. B. Lehmann** *und* **R. O. Neumann**, *Atlas und Grundriß der Bakteriologie, 2. Aufl., München 1907.* — **Arthur Meyer**, *Praktikum der botanischen Bakterienkunde, Jena 1903.* — **Alexander Nathansohn**, *Stoffwechsel der Pflanzen, Leipzig 1910.* — **Wilhelm Pfeffer**, *Pflanzenphysiologie, 2. Aufl., Leipzig 1897 und 1904.*

W. Benecke.

Bakterien.

Stickstoffbindung durch Bakterien.

1. Allgemeines. Stickstoffverbindungen werden vor allem in der Landwirtschaft in großer Menge gebraucht, weil hohe Pflanzenernten in erster Linie davon abhängen, daß reichliche Mengen von Stickstoff im Boden vorhanden sind. Da aber die zur Verfügung stehenden Produkte des tierischen Stoffwechsels nicht genügen, um diesen Stickstoffbedarf einer hoch entwickelten Landwirtschaft zu decken, auch durch Verzettelung ein großer Teil des aus landwirtschaftlichen Betrieben in Produkten verkauften Stickstoffs nicht wieder zur Landwirtschaft zurückkehrt und verloren geht, muß stickstoffhaltiger Kunstdünger verwendet werden. In welchem Umfange dies bereits geschieht, beweist die Statistik, wonach in Deutschland 1909 für rund 100 Millionen M. Chilesalpeter und für 70 Millionen M. schwefelsaures Ammoniak, die beiden wichtigsten stickstoffhaltigen Kunstdüngemittel, verbraucht wurden.

Unter diesen Umständen muß die Nachricht ernste Besorgnis hervorrufen, daß die Salpete lager in Chile ihrer Erschöpfung stark entgegen gehen, so daß Ersatz für diese Stickstoffquelle geschaffen werden muß. Denn der der Landwirtschaft zur Verfügung stehende Stickstoffvorrat darf nicht zurückgehen, sondern muß im Gegenteil im Interesse einer Ernteerhöhung steigen. Die dazu nötige Stickstoffmenge ist nach Paul Wagner aber sehr beträchtlich. Denn eine Erhöhung der jetzigen deutschen Getreidemittelernte von 18 dz Körner per ha um 3 dz, was nach den agrikulturchemischen Düngungsversuchen möglich wäre, würde den Stickstoffbedarf der deutschen Getreideäcker von 1,5 auf 3,4 Millionen dz Stickstoff vermehren. Die Quelle, aus der Ersatz für den versiegenden Chilesalpeter beschafft und der vermehrte Stickstoffbedarf der Landwirtschaft gedeckt werden muß, ist die atmosphärische Luft, die im Kubikmeter für 1 M. Stickstoff enthält, wenn dieser zum Chilesalpeterpreis gerechnet wird. Dieser Luftstickstoff ist aber freier Stickstoff, der für die Pflanzen mit Ausnahme der Leguminosen nicht verwertbar ist, sondern erst dann, wenn er in geeignete Verbindungen übergeführt wird. Diese Aufgabe hat die chemische Industrie in den letzten Jahren mit lebhaftem Eifer und großem Erfolg in die Hand genommen (vgl. den Artikel „Stickstoff"). Schon lange ist aber bekannt, daß zur Ueberführung des freien Luftstickstoffs in Verbindungsform keine kostspieligen Fabrikanlagen nötig sind, sondern daß dies auch niedere Organismen des Bodens können.

2. Geschichte. Berthelot zeigte schon, daß Boden sich nach längerer Aufbewahrung an der Luft mit Stickstoff anreichert, daß durch Hitze sterilisierter Boden dies aber nicht tut. Diese durch andere bestätigte Beobachtung ist geeignet, zur Erklärung der praktischen Erfahrung beizutragen, die besonders von Kühn und Vibrans zahlenmäßig belegt worden ist, daß man aus schwerem Boden mehr Stickstoff durch Pflanzenernten gewinnen kann, als man in der Düngung gab, während leichter Boden dies nicht erlaubt, sondern im Gegenteil Stickstoffverluste veranlaßt.

Die genauere Kenntnis der den Boden mit Luftstickstoff anreichernden niederen Organismen, deren Existenz im allgemeinen Berthelot zeigte, verdanken wir Winogradsky und Beijerinck. Ersterer zog in Reinkultur Clostridium Pastorianum, eine buttersäurebildende Bakterienform, während Beijerinck einen als Azotobacter bezeichneten Organismus auffand, der vielleicht zu den Bakterien, vielleicht auch zu den chlorophyllosen Algen gehört und viel kräftiger als das genannte Clostridium freien Stickstoff bindet. Für Pilze ist die Fähigkeit der Luftstickstoffbindung auch mehrfach behauptet worden,

wahrscheinlich aber nur infolge unrichtiger Deutung der betreffenden Analysen.

3. Vorkommen, Verbreitung und Kultur. Man kann solche stickstoffbindenden Organismen sich verschaffen und leicht deren Verbreitung studieren, wenn man eine 2 proz. Rohr- oder Traubenzuckerlösung mit etwas Erde impft. Bald entsteht dann eine weiße Kahmhaut, die die Flüssigkeit bedeckt und die beim Eintrocknen, z. B. da, wo sie an der Glaswand hochkriecht, sich dunkelkaffeebraun verfärbt. Unter dem Mikroskop erweist sich diese Kahmhaut meist vorwiegend als aus annähernd kugeligen Zellen oder kurzen dicken Stäbchen bestehend, die manchmal in Sarcinaform gruppiert sind. Alle diese Zellen nehmen mit Jodjodkalium eine schön goldbraune Färbung an und gehören zur Gattung Azotobacter (benannt nach dem französischen azote = Stickstoff).

Untersucht man andererseits die Flüssigkeit solcher Kulturen, so bemerkt man in der Mitte oder an einem Ende spindelig aufgeschwollene Stäbchen, die sich mit Jodjodkalium mit Ausnahme des einen Endes, an dem später eine große Spore entsteht, braunviolett färben. Das sind Angehörige der sticktoffbindenden Buttersäurebakteriengruppe. Durch solche Versuche findet man in sehr zahlreichen, aber nicht in allen Bodenproben schwerer und leichter Art, auch im Dünensand, die beschriebenen wichtigsten stickstoffbindenden Bakterienformen, die also sehr weit auf der Erde verbreitet sind. Außerdem kann man in solchen flüssigen Mischkulturen, die durch Impfen von Zuckerlösung mit Erde erhalten sind oder in entsprechend hergestellten Reinkulturen von Azotobacter oder Clostridium, worüber die Spezialliteratur zu vergleichen wäre, durch chemische Analyse sich leicht überzeugen, daß die Kultur infolge des Wachstums der Bakterien stickstoffreicher wird.

4. Die Energiequellen für die Stickstoffbindung. Diese Fähigkeit solcher Bakterien, Stickstoff zu binden, hat man dahin zu verstehen, daß sie bei ihrer Vermehrung zum Aufbau ihrer Körpersubstanz freien Stickstoff verwenden können, sie bilden also aus freiem Stickstoff Eiweiß und ähnliche Substanzen.

Aber ebenso wie rein chemisch freier Stickstoff nur schwierig in Verbindungsform überzuführen ist, wie er erst bei recht hoher Temperatur sich zu Salpetersäure oxydieren läßt, brauchen die Bakterien viel Energie zur Stickstoffestlegung. Ueberall aber, wo geeignetes Energiematerial und die betreffenden Bakterien vorhanden sind, tritt denn auch Luftstickstoffbindung ein. Für die Abschätzung der Bedeutung der Luftstickstoffbindung durch Bakterien im Haushalte der Natur und im praktischen Betriebe der Landwirtschaft ist daher neben dem Nachweis des Vorhandenseins stickstoffbindender Bakterien die Frage die allerwichtigste, welche Energiequellen für diese Bakterien brauchbar sind und welche davon in genügender Menge zur Verfügung stehen, wobei in landwirtschaftlicher Beziehung auch der Kostenpunkt eine wichtige Rolle spielt.

Man kann sich nun leicht überzeugen, daß verschiedene Zuckerarten, z. B. Dextrose und Rohrzucker, dann die diesen verwandte Stärke und weiter Mannit, geeignete Energiequellen für stickstoffbindende Bakterien sind. Setzt man diese Substanzen dem Boden zu, der stickstoffbindende Bakterien enthält, so reichert er sich mit Stickstoff aus der Luft an. In der freien Natur oder auf dem Acker sind solche Energiematerialien in Pflanzenresten u. dgl. vorhanden, sie werden auch durch die Assimilationstätigkeit der Algen und ähnlichen niederen grünen Organismen, die den Ackerboden mit einem grünen Anflug überziehen, den stickstoffbindenden Bakterien geliefert. Darauf deutet schon die alte landwirtschaftliche Erfahrung hin, daß ein mit Algen begrünter Ackerboden sich in guter „Gare" befindet und reiche Ernte verspricht. Tatsächlich hat dann Hellriegel gezeigt, daß Sand in gläsernen Gefäßen, soweit das Licht eindrang und sich infolgedessen Algen entwickelten, sich mit Stickstoff anreicherte. Und Bouilhac und Giustiniani bewiesen durch Topfkulturversuche, daß mit Algen und stickstoffbindenden Bakterien geimpfter Sand ebenso reiche Ernten bringt, wie nach kräftiger Düngung mit Chilesalpeter. Daß Assimilationsprodukte der Algen stickstoffbindenden Bakterien Energie liefern, hat wahrscheinlich auch für den Stickstoffhaushalt des Meeres Bedeutung, denn Reinke fand auf großen Meeresalgen massenhaft Azotobacter aufsitzend und glaubt demnach, daß die Organismen des Meeres mit Hilfe dieser stickstoffbindenden Bakterien Luftstickstoff zur Ernährung verwenden, da der ihnen durch die Flüsse zugeführte Stickstoff nicht genüge.

Die genannten Kohlehydrate und höheren Alkohole stehen aber in der Natur und in der Landwirtschaft nur in mäßiger Menge zur Verfügung. Weit wichtiger ist daher die Frage, ob Zellulose, die in Pflanzenresten, im Stalldünger, Gründüngung, Rübenblättern usw. massenhaft in der Landwirtschaft, in der Laubstreu der Wälder z. B. auch in der freien Natur vorhanden ist, als Energiequelle für die stickstoffbindenden Bakterien brauchbar ist. Neuere Untersuchungen haben gezeigt, daß dies tatsächlich der Fall ist, und daß man Boden durch Zusatz von

Zellulose mit Luftstickstoff anreichern kann.

Diese Frage kompliziert sich aber dadurch, daß für die stickstoffbindenden Bakterien nicht die Zellulose direkt, sondern nur die unter dem Einfluß zelluloselösender Bakterien daraus entstehenden Abbauprodukte verwendbar sind, daß diese Lösung der Zellulose aber nur langsam vor sich geht und die deshalb nur in kleiner Menge entstehenden Lösungsprodukte nicht nur von stickstoffbindenden Bakterien, sondern auch von anderen, besonders auch den salpeterumsetzenden sehr gern verwertet werden. Deshalb verursacht Zellulosezusatz zu Boden bedeutende Schwächung der Pflanzenentwickelung, weil der Salpeter des Bodens durch salpeterumsetzende Bakterien, die von der Zellulose ihre Energie beziehen, in Eiweiß verwandelt wird und die Pflanzen so ihrer besten Stickstoffnahrung beraubt werden. Deshalb beobachtet man auch keine Stickstoffbindung, wenn man Zellulose zu Boden zusetzt. Beschleunigt man aber die Zelluloselösung durch Impfung des Bodens mit zellulosevergärenden Bakterien z. B. durch Zusatz einer kleinen Menge Pferdemistaufschwemmung, so tritt Luftstickstoffbindung in dem mit Zellulose versetzten Boden ein. Auf diese Weise dürfte eine neue Erklärung für die günstige Wirkung einer Stallmistdüngung gegeben sein.

Der Nachweis der Eignung von Zellulose als Energiematerial für stickstoffbindende Bakterien vermittelt auch das Verständnis für die Beobachtung Henrys, daß Wald in seiner zellulosehaltigen Laubstreu mit Hilfe der darin befindlichen stickstoffbindenden Bakterien etwa ebensoviel Luftstickstoff festlegt, wie er dem Boden jährlich Stickstoff zum Aufbau seiner Holzproduktion entzieht. Und ebenso verständlich erscheint nun auch der Stickstoffreichtum der Wiesenböden und die Beobachtung, daß Wiesen eine Stickstoffdüngung nicht lohnen. Die reichlich von der Wiese produzierten zellulosehaltigen Abfälle dürften luftstickstoffbindenden Bakterien soviel Energie liefern, daß auf diese Weise viel Luftstickstoff dem Boden einverleibt wird.

5. Die Bedingungen für die Bindung des Stickstoffs der Luft. Es erübrigt sich nun noch, zu erörtern, welche Bedingungen außer Bereitstellung ausgiebiger Energiequellen für eine ausgiebige Luftstickstoffbindung durch Bakterien nötig sind. Außer genügender Feuchtigkeit ist eine nicht zu niedrige Temperatur für den in Rede stehenden Prozeß nötig. Bei 7° findet in Erde noch keine Stickstoffbindung statt, wohl aber stark schon bei 15° und noch etwas mehr bei höherer Temperatur. Wesentlich gesteigert wird die Stickstoffbindung in Erde durch Zusatz von Phosphorsäure und $Fe_2(SO_4)_3$, nach einigen Angaben auch durch Kalk. Sehr günstig für das Wachstum von Azotobacter wirkt aus Erde dargestellter Humus und damit steht vielleicht in Verbindung, daß die stickstoffbindenden Bakterien, wenn sie längere Zeit außerhalb der Erde kultiviert werden, an stickstoffbindender Kraft einbüßen und dieselbe durch Kultur in Erde wiedererlangen.

Bezüglich der Ausnutzung der Energiequellen ist zu bemerken, daß per Gramm Zucker etwa 10 mg Stickstoff höchstens, und zwar von Azotobacter gebunden werden. Gab man 7 mal nacheinander 2 % Zucker zu Göttinger Boden in achttägigen Zwischenräumen, so wurden 80 mg Stickstoff per 100 g Boden gebunden, was einer Düngung von 100 Zentnern Chilesalpeter per Morgen auf eine 30 cm dicke Ackerkrume berechnet gleichkommen würde, während in der Landwirtschaft bei Getreide eine Gabe von 1 Zentner Chilesalpeter per Morgen schon eine recht kräftige Düngung darstellt. Wie oben bemerkt, ist der Stickstoff von den Bakterien zunächst als Eiweiß und ähnliche Körperbestandteile festgelegt. Da diese nicht von den höheren Pflanzen ohne weiteres aufgenommen werden können, fragt es sich, ob eine Stickstoffanreicherung des Bodens durch luftstickstoffbindende Bakterien überhaupt von Vorteil für die in solchem Boden wurzelnden Pflanzen ist. Bezügliche Versuche ergaben, daß der in Boden nach Zuckerzugabe in den Bakterienkörpern niedergelegte Luftstickstoff schnell nitrifiziert, d. h. von Bodenbakterien zuerst in Ammoniak und dann in Salpeter umgewandelt wird und dann kräftige Pflanzenernährung und starke Ernteerhöhung bewirkt. Eine Gabe von 2 % Zucker zum Boden bewirkte im ersten Jahre so eine Ernteerhöhung auf das Dreifache und in den folgenden Jahren war eine Nachwirkung deutlich, so daß also der in Bakterien niedergelegte Stickstoff ebenso nach und nach zur Wirkung hinsichtlich der Erntesteigerung kommt, wie der von Stallmist, Gründüngung oder überhaupt irgendwelchen im Boden vorhandenen pflanzlichen oder tierischen Resten.

6. Die Knöllchenbakterien der Leguminosen. Außer den bisher beschriebenen frei im Boden lebenden stickstoffbindenden Bakterien gibt es andere, die in Knöllchen an den Wurzeln der Leguminosen, also der mit Schmetterlingsblüten ausgestatteten Pflanzen, leben und diesen dadurch die anderen Pflanzen abgehende Fähigkeit verleihen, den freien Stickstoff der Luft zu ihrer Ernährung zu verwenden.

Ueber die Entwickelung unserer Kenntnisse in dieser Frage ist folgendes zu bemerken: Daß die Leguminosen bodenver-

bessernd wirken, war schon im Altertum bekannt und man lehrte damals schon, daß das Feld nach Luzerne und Wicken nicht gedüngt zu werden brauchte. Lawes und Gilbert in Rothamsted erkannten dann, daß es sich hierbei um eine Stickstoffwirkung handele, und Schultz-Lupitz wies von neuem (1883) nachdrücklich die Forscher auf dieses Problem hin, indem er leichten Boden durch 15 Jahre hintereinander fortgesetzten Lupinenbau stickstoffreicher machte.

Trotzdem die bakterienführenden Knöllchen der Leguminosen schon seit Jahrhunderten beschrieben waren, herrschten über dieselben und über die bakterien- und pilzfadenähnlichen Einschlüsse derselben die verworrensten Ansichten, bis Hellriegel 1886 durch eine vorzügliche Untersuchung Klarheit in der Frage schuf. Er zeigt, daß, während die Gramineen, die er zum Vergleich heranzog, einzig und allein auf die im Boden vorhandenen Stickstoffverbindungen angewiesen sind, den Leguminosen außerdem der elementare Stickstoff der Atmosphäre zur Verfügung steht, aber nur dann, wenn bestimmte Mikroorganismen des Bodens mit den Leguminosen in ein symbiotisches Verhältnis treten. Er erkannte, daß die Wurzelknöllchen der Leguminosen mit der erwähnten Luftstickstoffassimilation in einem ursächlichen Zusammenhange stehen.

Diese Schlüsse zog er aus einfachen klaren Versuchen, durch welche er zeigte, daß Leguminosen nur im unsterilisierten Boden vom Luftstickstoff leben können und daß diese Unabhängigkeit vom Bodenstickstoff gesichert wird durch Zusatz eines nicht gekochten Aufgusses eines Kulturbodens.

Welcher Art die von Hellriegel auf diese Weise nachgewiesenen Erreger der Knöllchenbildung und der Luftstickstoffassimilation der Leguminosen sind, bewies dann Beijerinck, der zuerst Reinkulturen von Bakterien aus Leguminosenknöllchen züchtete, während Prazmowski durch Einimpfung solcher Reinkulturen in sterilisierten Boden Knöllchenbildung an Erbsen hervorrief und dadurch zeigte, daß Bakterien die Knöllchenerzeuger sind. Diese Bakterien wandern in ein Wurzelhaar der Leguminose ein, es bildet sich ein Schlauch mit Zellulosewand, der das ganze Wurzelhaar durchzieht, dann die Wurzelrindenzellen durchsetzt, und unter Verzweigung bis in die innersten Wurzelrindenzellen vordringt. Mit Hilfe dieses Schlauches dringen die darin enthaltenen knöllchenerzeugenden Bakterien in die Wurzelrinde ein, treten in deren innerste Zellen über und veranlassen dadurch diese, sich mit Plasma zu füllen und sich lebhaft zu teilen. Dadurch entsteht als Abkömmling dieser so infizierten Wurzelrindenzellen das junge Knöllchen, das nun wächst, dadurch die Wurzelrinde sprengt und so schließlich als Knöllchen außen auf der Wurzel erscheint. Das erwachsene Knöllchen hat in seinem Innern ein großzelliges Gewebe, dessen mit dichtem feinkörnigem Inhalt ausgestattete Zellen mit Bakteroiden erfüllt sind, d. h. morphologisch veränderten Bakterien, welche z. B. Stäbchen, die an einem Ende aufgeschwollen oder gabelig verzweigt sind, darstellen und ein eigenartig differenziertes Plasma besitzen. Dieses Bakteroidengewebe wird von den Verzweigungen des oben beschriebenen Infektionsschlauches, der aus dem infizierten Wurzelhaar in die Wurzelrinde hineinwuchs, durchzogen, die wie Pilzfäden aussehen. Das Bakteroidengewebe ist umgeben von plasmaarmen Rindenzellen, zwischen denen Gefäßbündel verlaufen, die mit dem Gefäßsystem der Wurzel in Verbindung stehen. Außen ist das Knöllchen von einer Korkhülle umgeben. Bis zur beginnenden Samenreife der tragenden Pflanze erscheint das Knöllchen prall und st prozentisch stickstoffreicher wie die Wurzel, während der Reife der Samen wird das Knöllchen schlaff und gibt Stickstoff an die Samen ab. Schließlich verfault es und dabei gelangen die in ihm noch vorhandenen Bakterien wieder in den Boden.

Ueber den Mechanismus der Stickstoffbindung durch diese Leguminosenbakteriensymbiose weiß man noch wenig. Die Knöllchenbakterien in Reinkultur außerhalb der Leguminose haben jedenfalls nur zweifelhafte Andeutungen von Stickstoffbindung ergeben. Innerhalb der Leguminose verhalten sie sich möglicherweise anders. Bezüglich der Stickstoffentnahme aus den Knöllchen fanden Nobbe und Hiltner, daß Erbsen mehr Luftstickstoff assimilierten, als das Gesamtgewicht ihrer Knöllchen betrug. Dies spricht jedenfalls nicht dafür, daß die Pflanze die Bakteroiden einfach aufzehrt und sich auf diese Weise des durch die Bakterien gebundenen Luftstickstoffs bemächtigt. Hiltner meint vielmehr, daß die Pflanze den Bakteroiden beständig Eiweiß entzieht, daß diese den Verlust durch Luftstickstoffassimilation aber wieder ergänzen.

Bakteroiden kann man auch außerhalb der Leguminose in Lösungen, die reich an organischen Säuren oder Kohlehydraten sind, erzeugen.

Die Stickstoffbindung der Leguminosen wird praktisch zur Stickstoffanreicherung des Bodens viel benutzt; man läßt die Leguminosen im landwirtschaftlichen Betriebe entweder reif werden, erntet sie ab und läßt nur Wurzeln und Stoppelrückstände im Boden oder man pflügt sie in voller Entwickelung als Gründüngung unter. In welchem Um-

fange dies geschieht, beweist der Umstand, daß in Preußen 1900 365 442 ha Lupine und 209 141 ha Seradella, die beiden wichtigsten Gründüngungspflanzen des leichten Bodens, gebaut wurden. Für diesen Leguminosenanbau ist es nach dem Vorstehenden sehr wichtig, daß die Leguminosen ordentlich Knöllchen bilden und die dazu nötigen Bakterien im Boden vorhanden sind. Tatsächlich ist dies meist der Fall. Nur wenn die Leguminosen auf einem ihnen nicht zusagenden Boden kultiviert werden, wie Lupinen oder Seradella auf schwererem Boden, bleibt die Knöllchenbildung aus. In solchen Fällen hat man mit gutem Resultat versucht, den Boden mit Knöllchenbakterien zu impfen. Große Erfolge hat Salfeld in dieser Richtung bei Moorkulturen gehabt, wo die Erbsen keine Knöllchen bildeten und schlecht gediehen, bis er Erde von Leguminosenfeldern als Impferde aufstreute und so die Leguminosenentwickelung wesentlich verbesserte.

Aber noch in anderer Beziehung hat die Bodenimpfung mit Knöllchenbakterien Bedeutung. Nobbe und Hiltner haben gezeigt, daß Knöllchenbakterien an die Leguminosenart, aus deren Knöllchen sie entnommen werden, sich in der Weise angepaßt zeigen, daß sie an Pflanzen derselben Art zahlreichere und kräftiger Stickstoff bindende Knöllchen erzeugen, als dies Bakterien aus einer anderen Leguminosenart tun. Sie empfehlen deshalb Kulturen von Leguminosen mit an die betreffende Leguminosenart angepaßten Knöllchenbakterien zu impfen, um möglichst große Stickstoffassimilation zu erzielen. Solche angepaßte Knöllchenbakterienkulturen sind unter dem Namen Nitragin im Handel und zu beziehen von den Agrikulturwerken A. Kühn in Wesseling-Köln. Ein ähnliches Präparat, das Feilitzen warm empfiehlt, nach Simon in Dresden, vertreiben Humann und Teisler in Dohna (Bezirk Dresden) unter dem Namen Azotogen.

Die Anwendung solcher Bakterien hat anfänglich Schwierigkeiten gemacht, bis man fand, daß die zur Impfung des Saatgutes verwendeten Bakterien durch Ausscheidungen der Samen leiden, wenn sie mit trockenem Saatgut in Berührung gebracht werden. Man muß daher das Saatgut einquellen oder da dies im landwirtschaftlichen Betriebe wegen der Schwierigkeit, gequollenes Saatgut auf den Acker zu säen, nicht wohl durchführbar ist, ist es besser, den Bakterien Nährstoffe wie Magermilch oder Peptontraubenzuckerlösung beizugeben, und mit diesem Gemisch trockenes Saatgut anzufeuchten. Nach Anwendung dieses Verfahrens kann man öfter gute Erfolge der beschriebenen Impfung beobachten, es scheint aber doch, als ob die Leguminosen, wenn sie in ihnen zusagendem Boden wachsen, ohne Impfung so gut Knöllchen bilden, daß auch die nach den verbesserten Verfahren ausgeführte Impfung den Ertrag nicht wesentlich steigert. Große Erfolge der Impfung beobachtet man dagegen, wenn die Leguminosen in ihnen nicht zusagendem Boden wachsen müssen.

Alnus, Elaeagnaceen und einige andere Pflanzen bilden ebenfalls Knöllchen und assimilieren freien Stickstoff. Ueber den Mechanismus dieses Vorganges und den die Knöllchen erzeugenden bezw. bewohnenden Organismus ist aber noch wenig bekannt.

Literatur. *Handbuch der technischen Mykologie, Bd. III. Herausgegeben von Lafar. Jena.* — **Löhnis**, *Handbuch der landwirtschaftlichen Bakteriologie, Berlin.* — **Kochs** *Jahresbericht über die Lehre von den Gärungsorganismen und Enzymen. Erschienen seit 1890, Leipzig.*

A. Koch.

Bakterien.

Nitrifikation durch Bakterien.

1. Die früheren Anschauungen über Nitrifikation. 2. Versuche von Schlösing und Müntz. 3. Winogradskys Untersuchungen. 4. Die zwei Stadien der Nitrifikation. 5. Der Nitritbildner und sein Wachstum auf flüssigen und festen Nährböden. 6. Nitrosomonas und Nitrosococcus und ihre Abarten. 7. Kohlensäureassimilation in Abwesenheit von Chlorophyll. 8. Verhalten gegen organische Substanzen. 9. Ausscheidung von freiem Stickstoff. 10. Der Nitratbildner (Nitrobacter). 11. Wachstum auf flüssigen und festen Nährböden. 12. Verhalten gegen organische Substanzen und Kohlensäure. 13. Hemmende Wirkung von Ammoniaksalzen. 14. Nitrifikation von organischem Stickstoff. 15. Nitrifikation im Boden. Verlauf des Prozesses unter natürlichen und Laboratoriumsbedingungen. 16. Chilisalpeter. 17. Salpeterhütten. 18. Rolle der Nitrifikationsmikroben in geologischen Zeitaltern.

Die im Boden bei Eiweißfäulnis und bei der Harnzersetzung entstehenden Ammoniaksalze werden unter Einwirkung einer besonderen, überaus charakteristischen Bakteriengruppe weiter oxydiert, wobei salpetersaure Salze entstehen. In einigen Gegenden verläuft dieser Prozeß in hohem Grade energisch. So bedeckt sich z. B. in Indien (Gangestal), Spanien (Umgebung von Saragossa, Valencia), in Südamerika, der Boden in der trockenen Jahreszeit mit einem weißen, aus kristallischem Salpeter bestehenden Belag. Dieser Oxydationsprozeß, welcher in der Natur eine große Rolle spielt, wird als Nitrifikation (Nitrum=Salpeter), die ihn bedingenden Mikroorganismen aber

als Nitrifikationsbakterien bezeichnet. Ihre Lebenstätigkeit ist für den Landbau von hochgradiger Bedeutung, denn dank ihr nimmt die Fruchtbarkeit des Bodens zu. Nicht geringer ist auch ihre hygienische Bedeutung, denn die Nitrifikation stellt eine sehr wesentliche Stufe der Zersetzung und Mineralisation von organischen Stoffen dar, welche in stark bevölkerten Gegenden die oberflächlichen Bodenschichten überschwemen. Es verdient noch erwähnt zu werden, daß das Produkt der Nitrifikation, der Salpeter, einen unumgänglich notwendigen Bestandteil von Sprengstoffen, deren Fabrikation zu militärischen und technischen Zwecken in letzter Zeit kolossale Dimensionen angenommen hat, ausmacht. Von dem nach Europa importierten Chilisalpeter werden etwa 3/4 zu landwirtschaftlichen Zwecken und 1/4 in der Industrie verwendet.

1. Die früheren Anschauungen über Nitrifikation. Die Nitrifikation betrachtete man zu Anfang als einen rein chemischen Oxydationsprozeß des Luftammoniaks durch Sauerstoff oder Ozon im Boden, welcher hier die Rolle eines porösen Körpers spielt, der an seiner Oberfläche Gase (Ammoniak und Sauerstoff) kondensiert und eine katalysierende Wirkung ausübt. Daß diese Ansicht fehlerhaft ist, offenbarte sich, als nachgewiesen wurde, daß die Nitrifikation mit gleicher Leichtigkeit auch in flüssigen Medien stattfindet und daß Nitrate sich im Boden bilden, indem nicht freies Ammoniak, sondern Ammoniaksalze oxydiert werden.

2. Versuche von Schlösing und Müntz. Schon im Jahre 1862 äußerte sich Pasteur dahin, daß die Nitrifikation durch spezifische Mikroorganismen hervorgerufen wird. Ein Beweis hierfür wurde erst 16 Jahre später, im Jahre 1878, von den französischen Gelehrten Schlösing und Müntz geliefert. Ihr berühmter Versuch bestand darin, daß sie ein 1 m langes Glasrohr, welches mit Sand und Kreide angefüllt war, Ammoniaksalze enthaltendes Spülwasser langsam durchfließen ließen; zu gleicher Zeit wurde fortlaufend Luft durch das Rohr getrieben. Unter diesen Bedingungen fand Nitrifikation statt und konnten im abfließenden Wasser salpetersaure Salze entdeckt werden, welche im Spülwasser nicht enthalten waren. Erhitzen bis auf 110° oder Chloroformzusatz, welche das Leben der Mikrobien zum Stocken brachten, hemmten auch die Nitrifikation. Dagegen förderten die Nitrifikation eine Temperatur von 37°, Luftzutritt, Kreidezusatz und eine mäßige Konzentration der Ammoniaksalze. Den Erreger dieses Oxydationsprozesses bezeichneten Schlösing und Müntz als „ferment nitrique", sie konnten ihn jedoch nicht in Reinkultur gewinnen. Die in dieser Richtung angestellten Versuche späterer Autoren, Heraeus, Celli und Marino-Zuco, Munro, Warington, Frankland u. a. scheiterten vollständig. Die Nitrifikationsbakterien weigerten sich hartnäckig, auf gewöhnlichen Bouillonnährmedien, welche in sonstigen Fällen mit so hervorragendem Erfolg angewandt werden, zu wachsen; ohne Reinkulturen aber konnte die Physiologie dieser interessanten Mikrobengruppe nicht studiert werden.

3. Winogradskys Untersuchungen. Einen Wendepunkt in der Geschichte der Frage bildete die im Jahre 1889 erschienene klassische Veröffentlichung über Nitrifikation von Winogradsky. Von der Tatsache ausgehend, daß seine Vorgänger bei ihren Versuchen, Nitrifikationsmikroben auf Bouillonnährmedien zu züchten, systematisch Mißerfolge zu verzeichnen hatten, verzichtete Winogradsky von Anfang an auf die Verwendung solcher Nährmedien, indem er ganz richtig annahm, daß organische Stoffe auf die Entwickelung dieser Bakterien vernichtend wirken. Er studierte den Prozeß in rein mineralischen Flüssigkeiten, welche Ammoniak- und sonstige Salze, die für die Ernährung der Bakterien notwendig waren, enthielten. Die Nitrifikation spielte sich unter derartigen Bedingungen durchaus in normaler Weise ab, und es gelang dank der elektiven Eigenschaft des Nährbodens mit Leichtigkeit, durch aufeinanderfolgende Ueberimpfungen eine Menge von beigemengten, dem Prozeß nicht zuträglichen Arten zu beseitigen und eine Anreicherung der Kultur mit spezifischen Mikroorganismen zu erzielen.

Die Isolation von Nitrifikationsbakterien auf festen Nährböden gelang Winogradsky zu Anfang durch Anwendung einer geistreichen Methode der „negativen Platten". Das Wesentliche der Methode bestand darin, daß man erst einen festen Bouillonnährboden mit einem Bakteriengemisch, welches Nitrifikationsbakterien enthielt, infizierte, sodann eine Ueberimpfung aus den scheinbar sterilen Stellen vornahm, in der Voraussetzun daß dort nur Keime der Nitrifikationsbakterien, welche auf dem betreffenden Nährboden sich nicht zu Kolonien entwickelt hatten, übrig geblieben waren. Später wurden zur Isolation von Nitrifikationsbakterien andere Methoden, welche sicherer zum Ziele führen, angewandt (s. unten). Nachdem Reinkulturen gewonnen worden waren, konnte man bereits zu einem genauen Studium der Eigenschaften von Nitrifikationsbakterien schreiten, und gegenwärtig stellt das Kapitel über Nitrifikation einen der am genauesten ausgearbeiteten Abschnitte der Mikrobiologie dar.

4. Die zwei Stadien der Nitrifikation. Zur anfänglichen Impfung von Lösungen, in denen Nitrifikation hervorgerufen werden soll, nimmt man am besten humusreiche Gemüsegartenerde. Walderde ist für diesen Zweck wenig tauglich, da sie gewöhnlich keine Nitrifikationsmikroben enthält (Migula). Die Kultur wird in konischen Kolben, welche einen aus Magnesiumcarbonat (zur Neutralisation der sich entwickelnden Säure) bestehenden Bodensatz und eine dünne Schicht Flüssigkeit folgenden Bestandes enthält:

	Gramm
Ammoniumsulfat	2
Chlornatron	2
Kaliumphosphat	1
Magnesiumsulfat	0,5
Eisenoxydulsulfat	0,4
Destilliertes Wasser	1000

Bei einer Temperatur von 25 bis 30° beginnt die Nitrifikation nach einigen Tagen, was sich durch Entwickelung von Nitriten oder Nitraten in der Flüssigkeit kundgibt. Je weiter der Prozeß vorschreitet, um so mehr wächst ihre Menge an und vermindert sich diesem parallel der Gehalt an Ammoniaksalz in der Flüssigkeit.

Man nahm zu Anfang an, daß die Nitrifikation durch eine Art, welche Ammoniaksalze direkt zu Nitraten oxydiert, hervorgerufen wird. Winogradsky wies jedoch nach, daß der Prozeß in 2 Phasen verläuft: anfangs werden die Ammoniaksalze zu Nitriten, später diese letzteren zu Nitraten oxydiert, wobei ein jeder dieser Prozesse durch eine besondere Art hervorgerufen wird. Die Nitrifikationsreaktion kann in folgender Weise dargestellt werden:

1. Phase $2\,NH_3 + 3O_2 = 2\,HNO_2 + 2H_2O$
2. Phase $2\,HNO_2 + O_2 = 2\,HNO_3$.

Die bei der Nitrifikation entstehenden Säuren werden im Boden durch kohlensaure Calcium- und Magnesiumsalze neutralisiert.

5. Der Nitritbildner und sein Wachstum auf flüssigen und festen Nährböden. Die erste Phase der Nitrifikation oder Oxydation von Ammoniaksalzen zu Nitriten wird durch einen Mikroben, den wir als Nitritbakterie bezeichnen wollen, hervorgerufen. Um diese Bakterie zu isolieren, fertigt man in oben beschriebener Weise eine Kultur an und züchtet dieselbe durch aufeinanderfolgende Ueberimpfungen unter denselben Bedingungen durch eine Reihe von Generationen (4 bis 5); sobald die Kultur eine genügende Menge des spezifischen Mikroben enthält, wird letzterer auf festen Nährmedien isoliert. Gewöhnlich wird zu diesem Zwecke „Kieselsäuregallerte" oder eine Kieselsäurelösung, welche nach Zusatz von Salzen zu der gallertigen Masse gerinnt (Winogradsky), verwandt. Auf diesem mineralischen Nährboden gedeiht der Nitrosebazillus ausgezeichnet, indem er gelbliche oder bräunliche scharfumrissene Kolonien bildet. Später jedoch, wenn an Stelle des oxydierten Ammoniaksalzes eine neue Portion desselben zur Kultur hinzugefügt wird, nehmen die Kolonien bedeutend an Dimension zu. Durch Ueberimpfungen aus diesen Kolonien in sterile flüssige Nährböden (siehe oben) kann man Reinkulturen des Nitrosebazillus erzielen. Weniger gebräuchlich sind als feste Nährmedien Magnesium-, Gips- oder Papierplatten (Omeliansky), Magnesiumplatten (Perotti), sowie Platten, die aus in besonderer Weise ausgelaugtem Agar (Beijerinck) angefertigt werden. Das Aussehen von auf derartigem Agar gezüchteten Kolonien ist aus Figur 1 ersichtlich.

6. Nitrosomonas und Nitrosococcus und ihre Abarten. Nitritbilder, welche



Fig. 1. Stück einer 6 Wochen alten, durch Uebergießen mit absolutem Alkohol getrockneten Agarplatte nach Beijerinck; geimpft in Strichen mit dem Nitritbildner aus Jeunvilliers.

aus Bodenproben verschiedener Länder isoliert worden sind, unterscheiden sich ihren morphologischen Merkmalen nach so stark voneinander, daß sie als verschiedene Arten angesehen werden.

Die westeuropäische Art, Nitrosomonas europaea, ist von Winogradsky aus dem Boden Zürichs und der Rieselfelder bei Paris (Jeunvilliers) kultiviert worden. Es sind dieses ellipsoide Zellen, deren Durchmesser $1 \times 1{,}5\ \mu$ beträgt (Fig. 2, 1 und 2); sie wachsen entweder als vereinzelte, in der Flüssigkeit gleichmäßig verteilte, bewegliche Zellen, welche mit einer kurzen Geißel versehen sind (Fig. 3), oder als voluminöse Zooglöen am Boden des Gefäßes, wobei bei den verschiedenen Rassen bald die eine,

bald die andere vegetative Form vorwiegt. Bewegliche Formen zeigen sich in der Flüssigkeit, sobald die Ammoniaksalze aus der Kultur verschwinden. Nach Zusatz dieser Salze büßt der Bazillus seine Geißel ein.

Etwas kleiner sind die Arten, welche aus Bodenproben von Kasan (Fig. 2,3), Algier, Tunis und Tokyo gewonnen wurden. Besonders klein (0,5 × 0,6 μ) ist die javanische Art, Nitrosomonas javanensis,



Fig. 2. Nitritbildner aus der Erde. 1. Zürich; 2. Jeunvilliers; 3. Kasan; 4. St. Petersburg. Vergrößerung 1000.

deren überaus lange Geißel den Körperdurchmesser des Bazillus etwa um das 60fache übertrifft (Fig. 4).

Die Nitritbildner der Neuen Welt besitzen das Aussehen von großen unbeweglichen Kokken und sind von Winogradsky als Nitrosococcusgattung zusammengefaßt worden. Ihr Durchmesser beträgt 2 μ



Fig. 3. Nitrosomonas europaea. Vergrößerung 1000.

Fig. 4. Nitrosomonas javanensis. Vergrößerung 1000.

(Campinas in Brasilien). Etwas kleiner ist die australische Art (aus Melbourne).

Kokkenform besitzt auch der Petersburger Nitritbildner (Fig. 2,4), nur ist er kleiner (1 μ). Er besitzt keine Geißeln und bei Züchtung auf festen Nährböden bildet er oftmals ein intensiver gefärbtes körnchenartiges Gebilde im mittleren Zellenteil.

Sämtliche Nitritbildner färben sich intensiv bei Bearbeitung mit den gewöhnlichen Anilinfarben und nach Gram.

7. Kohlensäureassimilation in Abwesenheit von Chlorophyll. Die Fähigkeit des Nitritbildners, in einem gar keine organischen Substanzen enthaltenden Nährboden zu leben und zu gedeihen, läßt sich durch die ihm unter allen lebenden Wesen ausschließlich zukommende Eigenschaft erklären, daß er freie oder halbgebundene (Bicarbonate) Kohlensäure assimiliert und Eiweiß aus mineralischen Substanzen in Abwesenheit von Licht und Chlorophyll synthesiert (Winogradsky). Die Energie, welche zu diesem endothermischen Prozeß notwendig ist, verschafft sich der Nitritbildner durch Oxydation von Ammoniak zu salpetriger Säure, und deshalb ist bei der Nitrifikation die Menge der assimilierten Kohlensäure derjenigen des oxydierten Ammoniaks proportional (ein Teil des assimilierten Kohlenstoffs entspricht 35,4 Teilen oxydierten Stickstoffs). Dem Charakter seiner Ernährung nach stellt also der Nitritbildner einen typischen prototrophen Organismus dar, welcher sein Eiweiß aus anorganischen Verbindungen synthesiert. Die Entdeckung der Fähigkeit des Nitritbildners, Kohlensäure durch Chemosynthese zu assimilieren, muß, wie A. Fischer ganz richtig bemerkt, als eine der wichtigsten Entdeckungen der modernen Physiologie angesehen werden.

8. Verhalten gegen organische Substanzen. Die hemmende Wirkung von organischen Stoffen auf die Entwickelung des Nitritbildners äußert sich um so stärker, je höher ihr Nährwert für die meisten übrigen Mikroben ist. Pepton und Glykose hemmen selbst in verschwindenden Konzentrationen (0,025 %) sein Wachstum, wirken ihm gegenüber als echte Antiseptika, wie z. B. Karbolsäure auf andere Bakterien. Schwächer wirken Substanzen, wie Bodenextrakte, ein aus faulenden Blättern hergestelltes Extrakt, humussaurer Ammoniak, welche in geringen Konzentrationen die Nitrifikation sogar begünstigen (Löhnis, Müntz und Lainé).

So empfindlich der Nitritbildner organischen Substanzen gegenüber ist, so leicht verträgt er die Wirkung von mineralischen Giften. Er entwickelt sich z. B. ausgezeichnet in Gegenwart von Salzen

schwerer Metalle und ruft Nitrifikation der Ammoniaksalze, der Arsensäure, des Fluor- und Jodwasserstoffes hervor (Boulanger und Massol).

Der Nitritbildner oxydiert organischen Stickstoff nicht direkt und nitrifiziert weder Eiweiß, noch Asparagin, ebenso wenig Harnstoff und selbst die einfachsten Amine (Omeliansky). Nur Ammoniaksalze sind für die Oxydationsarbeit dieses Mikroben zuträglich. Damit jedoch die Nitrifikation erfolgreich vonstatten geht, darf ihre Konzentration 0,2 bis 0,3% nicht übersteigen. In 1prozentiger Lösung hört die Entwickelung des Mikroben ganz auf.

9. Ausscheidung von freiem Stickstoff. Nach Angaben von Godlewsky wird ein Teil des Ammoniakstickstoffes (2 bis 16%) bei der Nitrifikation in ungebundenem Zustande ausgeschieden; wahrscheinlich handelt es sich hier um Zersetzung des salpetrigsauren Ammoniaks.

10. Der Nitratbildner (Nitrobacter). Die zweite Nitrifikationsphase besteht in der Oxydation von salpetrigsauren Salzen zu salpetersauren und wird durch einen besonderen Mikroben (Nitrobacter), welcher zuerst von Winogradsky aus einer südamerikanischen Bodenprobe isoliert worden ist, hervorgerufen. Dieses ist ein sehr kleiner, unbeweglicher Bazillus, welcher 0,3 bis 0,4 × 1 μ (Fig. 5) mißt und sich weder mit gewöhnlichen Anilinfarben noch nach Gram färben läßt. Um ihn zu färben, muß man zu Methoden greifen, welche zu Sporenfärbung angewandt werden. Im Gegensatz zu dem Nitritbildner zeichnen sich die Nitratorganismen, sogar solche, die aus sehr weit voneinander entfernten Gegenden herstammen, durch ihre vollkommene morphologische Identität aus.

11. Wachstum auf flüssigen und festen Nährböden. Zur Kultur dieses Microben hat Winogradsky folgende Nährmedien vorgeschlagen:

	Flüssiger Nährboden g	Fester Nährboden g
Natriumnitrat	1	2
Natriumcarbonat	1	1
Kaliumphosphat	0,5	in Spur.
Kochsalz	0,5	,,
Eisenoxydulsulfat	0,4	,,
Magnesiumsulfat	0,3	,,
Agaragar	,,	15
Destilliertes Wasser	1000	,,
Leitungswasser	,,	1000

Eine Konzentration des salpetrigsauren Salzes, welche die oben erwähnte Norm übersteigt, wirkt auf den Nitrifikationsprozeß schädlich ein, bei einer Konzentration von 2% MNO_2 hört derselbe ganz auf.

In flüssigen Kulturen bildet das europäische Nitrobacter am Boden des Gefäßes einen kaum merkbaren krümeligen Bodensatz; die südamerikanische Art dagegen wuchert als zarte Membran, welche den Boden und die Wandungen der Gefäße bedeckt. Es werden ebensolche Gefäße benutzt, wie für die erste Nitrifikationsphase.

Das Verhalten des Nitrobacter zu organischen Stoffen und zur Kohlensäure ist im allgemeinen das nämliche, wie bei dem Nitritbildner. Die zur Kohlensäureassimilation erforderliche Energie wird durch Oxydation von Nitriten zu Nitraten beschaffen. Das Verhältnis zwischen assimiliertem Kohlenstoff und oxydiertem Stickstoff ist bei dem Nitratbildner ein höheres, als wie bei dem Nitritmikroben: hier 1:40 bis 45, dort 1:35,4.

Fig. 5. Nitrobacter. Vergrößerung 1000.

12. Verhalten gegen organische Substanzen. Schon die Tatsache allein, daß das Nitrobacter auf mit gewöhnlichem Agar hergestellten Nährmedien gedeiht, deutet darauf hin, daß dieser Bazillus organischen Stoffen gegenüber weniger empfindlich ist, als wie der Nitritbildner. Die hemmende Traubenzuckerdosis ist hier doppelt so groß. Durch systematische Kultur des Nitrobacter auf Nährböden mit ansteigendem Gehalt an organischen Stoffen kann man ein Wachstum dieser Art auf 50% Bouillon mit Zusatz von Nitriten erzwingen.

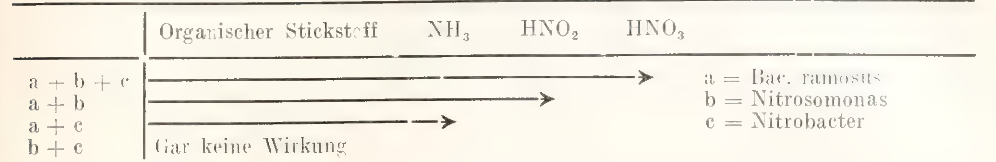
13. Hemmende Wirkung von Ammoniaksalzen. Die Entwickelung des Nitrobacter wird sogar durch minimale Mengen von Ammoniaksalzen, namentlich Ammoniumcarbonat (5 mg Ammoniak auf 1 l Flüssigkeit), gehemmt, während auf die Oxydationstätigkeit des Mikroben Ammoniaksalze fast gar keine Wirkung ausüben (Boulanger und Massol).

Die Oxydationsfunktion des Nitrobacter beschränkt sich auf Salze der salpetrigen Säure und erstreckt sich durchaus nicht auf Salze der schwefligen und phosphorigen Säure.

14. Nitrifikation von organischem Stickstoff. Sämtliche oben beschriebenen Eigenschaften beider Nitrifikationsorganismen lassen dieselben als einen scharf abgegrenzten physiologischen Typus, mit einer ganzen Reihe von nur ihm allein zukommenden Merkmalen zusammenfassen.

Die Wechselwirkung beider Nitrifikationsmikroben trägt den Charakter einer Meta-

biose. Wenn man verdünnte Bouillon mit einem Gemisch dreier Mikroben, eines solchen, der Eiweißsubstanzen zersetzt, und beider Nitrifikationsmikroben, infiziert, so führt ihre gemeinsame Arbeit zu vollständiger Nitrifikation des organischen Stickstoffes. Verwendet man zur Infektion verschiedene Kombinationen derselben Mikroben, so erzielt man folgende Resultate (Omeliansky).



Bei gleichzeitiger Infektion mit allen drei Mikroben geht die Mineralisation des organischen Stickstoffs konsekutiv, Schritt für Schritt vor sich. Zu Anfang zersetzt der Bacillus ramosus das Eiweiß unter Ammoniaksalzbildung. Solange die Lösung viele organische Stoffe enthält, beginnt die Arbeit des Nitroseorganismus noch nicht. Sie tritt erst dann zutage, wenn der Nährboden nur Eiweißspuren enthält. Andererseits wird die Arbeit des Nitrobacter in Gegenwart von Ammoniaksalzen paralysiert und kann nicht eher beginnen, als bis fast der Gesamtgehalt an Ammoniaksalzen vollständig zu Nitriten oxydiert ist. Diese Aufeinanderfolge erscheint zweckmäßig, denn sie schützt das sich entwickelnde Salpeter gegen Zersetzung durch denitrifizierende Bakterien, deren Tätigkeit in Abwesenheit von organischen Stoffen nicht möglich ist.

15. Nitrifikation im Boden. Verlauf des Prozesses unter natürlichen und Laboratoriumsbedingungen. Alle diese theoretischen Erwägungen haben jedoch nur insoweit einen Wert, als die Bedingungen eines gewöhnlichen Laboratoriumsversuches mit den Bedingungen des natürlichen Nitrifikationsprozesses im Boden verglichen werden können. Es weicht aber das, was wir in der Natur beobachten, ziemlich stark von dem oben angeführten Schema des Laboratoriumsversuches ab. Die Nitrifikation verläuft unter natürlichen Bedingungen im Boden, in Salpeterhütten oder in den Oxydationsbassins biologischer Filtern bei gleichzeitiger, nicht aber aufeinanderfolgender Tätigkeit beider Nitrifikationsmikroben, und eine intermediäre Entwickelung von salpetriger Säure kann dort fast gar nicht beobachtet werden. Bemerkenswert ist auch der Umstand, daß die Nitrifikation unter natürlichen Bedingungen weder durch einen bedeutenden Gehalt an organischen Stoffen, noch durch die Gegenwart von Ammoniaksalzen gehemmt wird. Eher verläuft die Nitrifikation in humusreichem Boden sogar energischer. Gefördert wird sie auch durch Zusatz von kleinen Glykosequantitäten zum Boden. Dieses letzte Ergebnis kann in der Weise erklärt werden, daß in einem so eminent porösen und gut durchlüfteten Medium, wie es der Boden darstellt, der Zusatz einer leicht oxydierbaren organischen Substanz (Glykose) nicht, wie in flüssigen Nährmedien, Reduktionsbedingungen schafft und deshalb die Nitrifikation auch nicht behindert. Weiter können dank der gleichzeitigen Wirkung von Mikroben, welche organische Substanz zersetzen, sich im Boden vereinzelte Gebiete bilden, welche fast ganz frei von organischer Substanz sind und in denen die Arbeit des Nitrifikationsmikroben unbehindert vonstatten geht. Was jedoch die Wirkung von Ammoniaksalzen anbetrifft, so haben wir schon darauf hingewiesen, daß sie nur die Vermehrung des Nitratmikroben, nicht aber seine Oxydationsarbeit behindern. Im Boden also, in dem die Nitrifikation fortwährend vor sich geht, und in welchem die Erreger dieses Prozesses in großer Menge vertreten sind, können Ammoniaksalze auf den Gang der Nitrifikation keine hemmende Wirkung ausüben, ebensowenig wie sie das im Laboratoriumsversuch bei ausgiebiger Infektion der Kultur tun können.

16. Chilisalpeter. Die Bildung kolossaler Salpeterablagerungen (von salpetersaurem Natron) in Chili, in der Atacamawüste, muß zweifellos der Tätigkeit von Nitrifikationsbakterien in geologischen Zeitaltern zugeschrieben werden. An den Bergabhängen waren Ueberreste organischen Lebens, vor allem immense Guanoablagerungen, d. h. die Dejektionen von Seevögeln, der Einwirkung von Mikroben ausgesetzt, weshalb ihr Stickstoff allmählich nitrifiziert wurde. Die hierbei entstandenen Nitrate wurden von den Bergabhängen fortgeschwemmt und sammelten sich im Küstengebiet an, welches sich durch sein regenloses Klima auszeichnet; hier lagerten sie sich in kristallinischer Form ab und bildeten mächtige, 1 bis 2 m dicke Schichten Salpeter, welches jetzt in der ganzen Welt als Düngungsmittel benutzt wird (Deutschland allein importiert alljährlich für viele Millionen Mark Chilisalpeter).

Die in naher Zukunft bevorstehende Erschöpfung dieser Ablagerungen bedeutet eine Verminderung der Produktivität des Erdbodens und bedroht also die Ernährungsquellen der Menschheit. Man muß also nach anderen Methoden fahnden, um den Verlust an Stickstoff im Boden zu decken. Einen bedeutenden Erfolg haben in dieser Beziehung in letzter Zeit zwei norwegische Gelehrte, Birkeland und Eide, erzielt, welche eine technische Methode zur Salpetergewinnung (und zwar zu einem Preise, der denjenigen von Chilisalpeter in Europa nicht übertrifft) durch Oxydation des Luftstickstoffs vermittels eines starken elektrischen Funkenbogens erfunden haben.

17. Salpeterhütten. In neuester Zeit sind Müntz und Lainé zu der vergessenen Methode der Salpeterhütten zurückgekehrt. Mit diesem Namen werden bekanntlich besondere Einrichtungen, welche in früheren Zeiten zur Salpetergewinnung aus organischen Ueberresten angewandt wurden, bezeichnet. Es wurden große lockere Haufen aus Mist, Erde, verschiedenen Abfällen, Asche und derartigen sonstigen Stoffen zusammengelegt, zwecks besserer Durchlüftung mit Reisig überschichtet und dann mit Harn, Seifenwasser, flüssigem Dünger usw. begossen. In derartigen Haufen spielten sich in den warmen Sommermonaten energische biochemische Prozesse ab, welche Zersetzung der organischen Substanz (Eiweiß, Harnstoff) und weitere Nitrifikation der entstandenen Ammoniaksalze zur Folge hatten. Müntz und Lainé nehmen an, daß man bei rationeller Einrichtung der Salpeterhütten aus lockeren Torfmassen in unbegrenzter Menge ungefähr zum Marktpreise Salpeter wird gewinnen können.

18. Rolle der Nitrifikationsmikroben in geologischen Zeitaltern. Die Nitrifikationsmikroben spielen dank der Bildung von Salpetersäure bei der Verwitterung von Gesteinen eine hervorragende Rolle. Müntz fand diese Mikroben an der Oberfläche von Felsen, welche gar keine Vegetation aufwiesen. Man könnte annehmen, daß diese kleinsten Lebewesen mit ihrem primitivsten Stoffumsatz die Vorkämpfer des organischen Lebens auf unserem Planeten waren.

Literatur. ***Winogradsky***, *Recherches sur les organismes de la nitrification. Annales de l'Inst. Pasteur, t. IV, 1890 u. t. V, 1891.* — ***Derselbe***, *Contributions à la morphologie des organismes de la nitrification. Archives des Sciences biologiques publ. p. l'Inst. Imp. de Médicine exper. à St. Petersbourg, Bd. 1, 1892.* — ***Derselbe***, *Zur Mikrobiologie des Nitrifikationsprozesses. Zentralblatt f. Bakt., 2 Abt., Bd. 2, 1896.* — ***Winogradsky und Omeliansky***, *Einfluß der organischen Substanzen auf die Arbeit nitrifizierender Mikrobien. Zentralbl. f. Bakt., 2 Abt., Bd. 5, 1899.* — ***Omeliansky***, *Ueber die Isolierung der Nitrifikationsmikroben aus dem Erdboden und Ueber die Nitrifikation des organischen Stickstoffes. Zentralbl. f. Bakt., 2 Abt., Bd. 5, 1899; kleinere Mitteilungen über Nitrifikationsmikroben. Bd. 8, 1902 u. Bd. 9, 1902.* — ***Winogradsky***, *Die Nitrifikation, Handb. der techn. Mykologie, Bd. III, 5. Kapitel, S. 132—181.* — ***Löhnis***, *Handb. d. landw. Bakt., S. 473—475 und 601—623.*

W. Omeliansky.

Bakterien.

Schwefelbakterien.

1. Die zwei Stadien der Schwefelwasserstoffoxydation. 2. Die Ablagerung von Schwefeltropfen im Körper der Schwefelbakterien. 3. Fundort der Schwefelbakterien. 4. Künstliche Kultur der Schwefelbakterien. 5. Farblose und rote Schwefelbakterien. 6. Verhalten der Schwefelbakterien gegenüber Sauerstoff und Licht. 7. Bakterienplatten.

1. Die zwei Stadien der Schwefelwasserstoffoxydation. Bei der biochemischen Zersetzung verschiedener schwefelhaltiger Substanzen, namentlich bei der Eiweißfäulnis, spaltet sich der Schwefel zumeist in Form von Schwefelwasserstoff, einer gasförmigen Substanz, die sich bekanntlich durch ihre giftigen Eigenschaften auszeichnet, ab. Indem er Boden und Untergrund der Städte durchtränkt und das Wasser der städtischen Wasseranlagen sättigt, kann der Schwefelwasserstoff die Gesundheit der Bevölkerung aufs ernsteste gefährden, und deshalb ist die Frage nach dem weiteren Schicksal dieses Gases in der Natur von bedeutendem nicht nur theoretischen, sondern auch praktischen Interesse.

Schon unter Einwirkung einer gewöhnlichen Oxydation durch Luftsauerstoff geht der Schwefelwasserstoff in Schwefelsäure über, jedoch läuft dieser Prozeß unter Einwirkung einer besonderen Gruppe von Oxydationsbakterien, der sogenannten Schwefelbakterien, die von Winogradsky zuerst genau studiert worden sind, viel energischer ab. Die Oxydation verläuft in zwei Phasen. Zu Anfang bildet der Schwefelwasserstoff, indem er sich mit Sauerstoff verbindet, Wasser und Schwefel:

$$2\ H_2S + O_2 = 2H_2O + S_2$$

sodann wird der Schwefel weiter oxydiert, wobei sich Schwefelsäure bildet:

$$2H_2O + S_2 + 3O_2 = 2H_2SO_4;$$

diese wird gewöhnlich durch Carbonate neutralisiert.

2. Die Ablagerung von Schwefeltropfen im Körper der Schwefelbakterien. Der zu Anfang ausgeschiedene Schwefel wird im Körper der Schwefelbakterien in Form von dickflüssigen

Tropfen abgelagert (Fig. 1) und dieser Prozeß setzt sich so lange fort, wie in der umgebenden Flüssigkeit noch Schwefelwasserstoff vorhanden ist. Fehlt es an diesem, so wird der Schwefel zu Schwefelsäure weiter oxydiert. Dieser ganze Prozeß entspricht bei den Schwefelbakterien der Atmung.

3. Fundorte der Schwefelbakterien. Die Schwefelbakterien vegetieren in stehenden Gewässern, an deren Boden organische Ueberreste in Fäulnis geraten, in Schwefelquellen und in flachen Meeres-

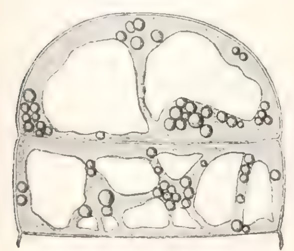


Fig. 1. Beggiatoa mirabilis Cohn. Optischer Längsschnitt durch die Spitze eines lebenden Fadens mit einer Endzelle und einer Binnenzelle. Im Protoplasma liegen viele Schwefeltropfen. Vergrößerung 900. Nach Hinze.

buchten. Bekannt sind farblose Schwefelbakterien, sowie auch solche, deren Färbung verschiedene Abstufungen von Rot und Violett darstellt. In den Küstengewässern Dänemarks entwickeln sich die Purpurbakterien nicht selten in so immensen Quantitäten, daß das Wasser durch sie grellrot gefärbt wird („rotes Meer“).

4. Künstliche Kultur der Schwefelbakterien. Eine Kultur der Schwefelbakterien gewann Winogradsky in der Weise, daß er auf den Boden eines hohen Zylinders ein Stück Wurzelknollen von Butomus umbellatus, ein wenig Schlamm und Gips brachte und den Zylinder bis nach oben mit Wasserleitungswasser anfüllte. Nach einem Monat entwickelten sich in dem Gefäß gewöhnliche farblose Schwefelbakterien. Nach Molisch kann man eine Kultur Purpurbakterien leicht gewinnen, indem man organische Substanzen (Ei, Fleischstückchen, Heu usw.) bei freiem Lichtzutritt unter Sauerstoffabschluß faulen läßt. Zu Anfang entwickeln sich farblose Bakterien, Infusorien, Algen, später, nach ein bis zwei Monaten, Purpurbakterien.

5. Farblose und rote Schwefelbakterien. Zu den farblosen Schwefelbakterien gehören vor allem die fadenförmigen. Zu der Gattung Beggiatoa gehören Schwefelbakterien, die das Aussehen von frei schwimmenden beweglichen Fäden von verschiedenen Dimensionen haben (Fig.2). Die Fäden sind entweder mit Schwefeltröpfchen angefüllt, oder sie enthalten deren eine sehr spärliche Menge, ja sogar auch gar nicht. Zur Gattung Thiothrix gehören unbe-

Fig. 2. Beggiatoa alba. Endstück eines Fadens: a in einem an H_2S reichen Nährboden; der Faden ist mit Schwefeltropfen dicht erfüllt. b nach 24 stündigem Verweilen in einer von diesem Gase freien Flüssigkeit; es sind nur noch wenige Schwefeltropfen vorhanden. c nach weiteren 48 Stunden; jene sind ganz verschwunden; die Querwände sind nun sichtbar, der Inhalt der einzelnen Glieder hat sich geballt. Vergrößerung 900. Nach Winogradsky.

wegliche Schwefelbakterien, die mit Hilfe besonderer schleimiger Kissen, die sich am Ende ihrer Fäden befinden (Fig. 3), ver-

Fig. 3. Thiothrix nivea. Gruppe von jungen Fäden, deren eines Ende mit Hilfe des (durch Punktierung veranschaulichten) Haftkissens sich an der Unterlage festgemacht hat. Vergrößerung 900. Nach Winogradsky.

schiedenen Gegenständen anhaften. In der Gruppe von farblosen Schwefelbakterien gibt es auch eine Reihe von nicht fadenförmigen Arten, wie z. B. das von Omeliansky beobachtete Thiospirillum Winogradskii (Fig. 4).

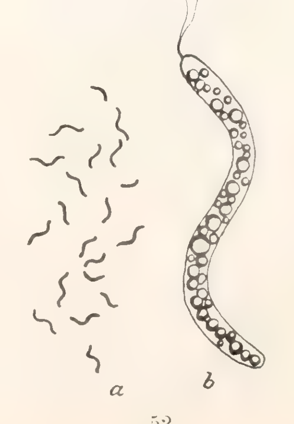


Fig. 4. Thiospirillum Winogradskii. a Vergrößerung 150; b Vergrößerung 1000.

Die Gruppe der purpurfarbenen Schwefelbakterien enthält einen sehr weiten Kreis von Arten, deren genaue Klassifikation von Winogradsky ausgearbeitet worden ist. Auf Figur 5 ist das rote Schwefelbacterium



Fig. 5. Chromatium Okenii. Vergrößerung 1000.

Chromatium Okenii abgebildet, der bereits von Ehrenberg beobachtet wurde.

6. Verhalten der Schwefelbakterien gegenüber Sauerstoff und Luft. Im Vergleich zu den farblosen Schwefelbakterien erfordern die Purpurbakterien eine geringere Sauerstoffkonzentration. Außerdem offenbaren sie positive Phototaxis und versammeln sich in Kulturen an der dem Licht zugekehrten Seite des Gefäßes.

7. Bakterienplatten. Für das Gedeihen der Schwefelbakterien sind Sauerstoff und Schwefelwasserstoff in gleichem Maße erforderlich, hierbei wird jedoch dieser, sobald er mit Sauerstoff zusammentrifft, sofort oxydiert. Deshalb entwickeln sich die Schwefelbakterien gewöhnlich in den Flüssigkeitsschichten, wo der von oben diffundierende Sauerstoff mit dem von unten aufsteigenden Schwefelwasserstoffstrome zusammentrifft. An dieser Stelle bildet sich gewöhnlich eine Bakterienplatte, d. h. eine in einem bestimmten Niveau lokalisierte massenhafte Schwefelbakterienansammlung (Fig. 6). Taucht man in das Wasser, das

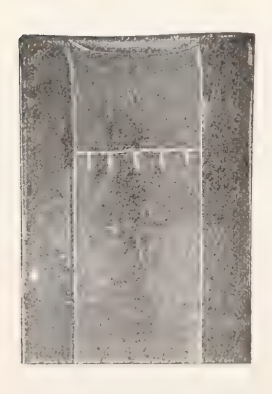


Fig. 6. Zucht von Schwefelbakterien aus den Limanen in schmalem Gefäße. In verkleinertem Maßstabe. Zu unterst schwarzer Limanschlamm; darüber die Flüssigkeit, deren gekrümmte Oberfläche eben noch am oberen Rande der Figur sichtbar ist; dazwischen die Bakterienplatte mit fünf Fontänen. Nach Jegunow.

eine derartige Membran enthält, einen Faden, der mit wässerigem Eisenoxyd durchtränkt ist, so wird er unterhalb der Membran durch Bildung von Schwefeleisen schwarz, oberhalb derselben aber entfärbt er sich durch Lösung von Eisenoxyd in Schwefelsäure.

Die oben beschriebenen Eigenschaften ihres Stoffwechsels lassen die Schwefelbakterien als einen scharf abgegrenzten physiologischen Typus erscheinen.

Literatur. ***Hinze,*** *Ueber den Bau der Zellen von Beggiatoa mirabilis., Ber. d. Deutsch. Bot. Ges. Bd. 19, 1901.* — ***Jegunow,*** *Sur les sulfobactéries des limans d'Odessa, Archiv des Sciences biolog., St. Petersbourg Bd. 3, 1895.* — ***Derselbe,*** *Bakterien-Gesellschaften, Centr. f. Bakt. 2 Abt., Bd. 2, 1896, Bd. 3, 1897 u. Bd. 4, 1898.* — ***Nathanson,*** *Ueber eine neue Gruppe von Schwefelbakterien und ihren Stoffwechsel, Mitt. aus der Zool. Station zu Neapel Bd. 15, 1902.* — ***Winogradsky,*** *Ueber Schwefelbakterien, Bot. Ztg. Bd. 45, 1887.* — ***Derselbe,*** *Beiträge zur Morphologie und Physiologie der Bakterien, Leipzig 1888.* — ***Derselbe,*** *Recherches physiologiques sur les sulfobactéries, Ann.. Pasteur Bd. 3, 1889.* — ***W. Omeliansky,*** *Der Kreislauf des Schwefels, Handb. d. techn. Mykologie Bd. III, Kapitel 8, S. 214 bis 244, Jena.* — ***H. Molisch,*** *Die Purpurbakterien, Jena 1907.*

W. Omeliansky.

Bakterien.

Eisenbakterien.

1. Erste Forschungen. Untersuchungen von Winogradsky und Molisch. 2. Fundort und Züchtung der Eisenbakterien. 3. Leptothrix ochracea, Crenothrix polyspora und andere Arten

1. Erste Forschungen. Untersuchungen von Winogradsky und Molisch. Wir finden bei Ehrenberg zuerst eine besondere Gruppe von Fadenbakterien erwähnt, deren Zellen von einer braunen Scheide umgeben sind. Cohn hat festgestellt, daß sich in der Scheide Eisenoxydhydrat ablagert, und die Vermutung ausgesprochen, daß dieser Prozeß mit den Lebensfunktionen der Eisenbakterien in engem Zusammenhang steht, indem er mit der intravitalen Ablagerung von Kieselsäure im Diatomeenpanzer in Analogie zu bringen ist. Im Jahre 1888 lieferte Winogradsky den Beweis dafür, daß die Oxydation der Eisenoxydulsalze durch das lebende Plasma der Eisenbakterien hervorgerufen wird und daß solche Oxydation im Leben der Eisenbakterien die Rolle des Atmungsprozesses spielt. Die Reaktion verläuft nach folgender Gleichung:

$$2\,FeCO_3 + 3\,H_2O + O = Fe_2(OH)_6 + 2\,CO_2.$$

Molisch ist es gelungen, Leptothrix ochracea in Reinkultur zu erhalten und zu zeigen, daß dieser Organismus in Nährlösung mit organischer Substanz ohne Zusatz von Eisen oder Mangan gedeihen kann. Durch die Untersuchungen von Lieske ist festgestellt, daß Spirophyllum ferrugineum

in anorganischer Nährlösung bei Gegenwart von Eisenoxydulkarbonat CO_2 assimiliert. Für andere Eisenbakterien gelang dieser Nachweis nicht. Die Eisenbakterien stellen mithin eine Gruppe von Organismen dar, die ernährungsphysiologisch durchaus nicht dieselben Eigenschaften aufweisen.

2. Fundort und Züchtung der Eisenbakterien. Eisenbakterien finden sich in Sümpfen, Teichen, Seen und Wasserleitungswasser sowie in Eisenquellen. Im Meerwasser sind sie bis jetzt nicht gefunden worden.

Um eine Kultur von Eisenbakterien zu gewinnen, bringt man in einen hohen Zylinder ausgekochtes Heu, frisch niedergeschlagenes Eisenoxydhydrat und zur Infektion ein wenig Schlamm. Sodann wird der Zylinder mit Brunnenwasser angefüllt. Die nach einiger Zeit sich entwickelnden Eisenbakterien bedecken als brauner Filz Wandungen und Boden des Zylinders. Molisch ist es gelungen, Reinkulturen von Eisenbakterien auf Agar mit Zusatz von 0,025 bis 0,05 % Manganpepton in Leitungswasser zu züchten.

3. Leptothrix ochracea, Crenothrix polyspora und andere Arten. Einen ganz gewöhnlichen Bewohner von Eisenquellen

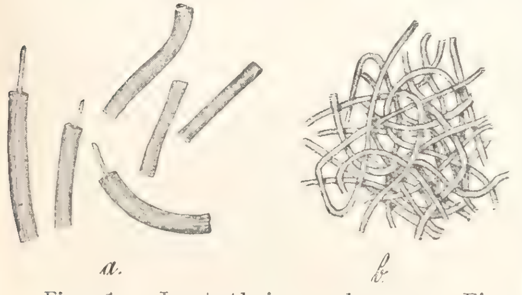


Fig. 1. Leptothrix ochracea. Eisenbakterien mit Scheiden, aus denen in a die Gliederketten hervorragen, die demnächst ausschwärmen würden. Darüber entleerte Scheiden. b Ein Knäuel der Eisenbakterien aus einer Rohkultur. Vergr. a 370; b 70. Nach A. Fischer.

stellt Leptothrix ochracea (Fig. 1) dar. Die nicht verzweigten Fäden dieses Bakteriums bestehen aus sehr dünnen zylindrischen Gliedern, die von einer braunen Scheide umgeben sind. Die jungen Fäden haften sich gewöhnlich mit einem Ende an feste Gegenstände, während sie mit dem anderen frei in der Flüssigkeit herumschwimmen. Die Vermehrung findet durch eiförmige, unbewegliche Gonidien statt, die nicht selten leeren Scheiden anhaften, woraus sich eine scheinbare Verzweigung ergibt. Die mit Eisenoxyd imprägnierten Hüllen sind sehr widerstandsfähig und zersetzen sich nach erfolgtem Absterben der Bakterien nur ganz langsam, wobei sich am Boden stehender Gewässer Ablagerungen von Sumpf- oder Seeneisenerz bilden

Eine andere Art von Eisenbakterien, Crenothrix polyspora, verunreinigt, indem sie sich im Wasserleitungsnetze entwickelt, die Sedimentierbrunnen und verengert den Durchmesser der Wasserleitungsröhren, bisweilen bis zum völligen Verschluß desselben. So besaß z. B. in Dresden ein Wasserleitungsrohr, das anfangs im Durchschnitt 10 cm maß, nach Verlauf von 30 Jahren einen Durchmesser von nur 4 cm. Ebenso häufig findet sich im Wasserleitungswasser eine andere Form, Gallionella ferruginea, die in ihrem Aussehen an eine Haarnadel mit geflochtenen Enden erinnert (Fig. 2). Vor kurzem hat Ellis ein Eisenbakterium, Spirophyllum ferrugineum, beschrieben, das das Aussehen eines spiralförmig gewundenen Bandes besitzt (Fig. 2). Zu den Eisenbakterien zählt man gewöhnlich auch die im Wasser ziemlich weit verbreiteten Fadenform, Cladothrix dichotoma (Fig. 3), die zuweilen braungefärbte Hüllen bildet. Lieske hat aber jüngst den Beweis gebracht, daß Cladothrix dichotoma in ihrer Scheide nur ganz geringe Mengen von Eisen aufnimmt und nicht zu den Eisenbakterien zu rechnen ist. Sie ist wohl meist mit Clonothrix fusca verwechselt worden.

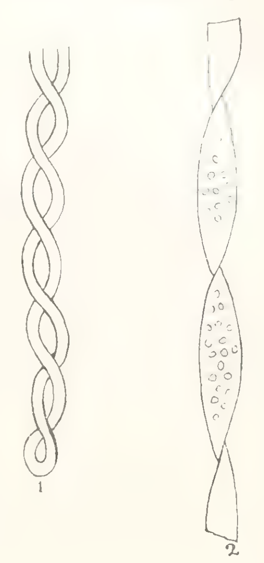


Fig. 2. 1. Gallionella ferruginea. 2. Spirophyllum ferrugineum.

Literatur. ***Winogradsky***, *Ueber Eisenbakterien. Bot. Ztg. Bd. 46, 1888.* — ***Zopf***, *Entwickelungsgeschichtliche Untersuchungen über Crenothrix polyspora, die Ursache der Berliner Wasserkalamität, Berlin 1879.* — ***Adler***, *Ueber Eisenbakterien in ihrer Beziehung zu den therapeutisch verwendeten natürlichen Eisenwässern. Zentr. f. Bakt., 2 Abt., Bd. 11, 1904.* — ***Cohn***, *Beitr. z. Biol. d. Pflanzen, Heft 3.* — ***H. Molisch***, *Die Pflanze in ihren Beziehungen zum Eisen, 1892.* — ***Derselbe***, *Die Eisenbakterien, Jena 1910.* — ***Rullmann***, *Die Eisenbakterien; Cladotricheen, Streptotricheen und Actinomyceten. Handb. d. Mykologie Bd. III, 7. Kap. S. 193–212.* — ***Lieske***, *Beiträge zur Kennt-*

nis der Physiologie von Spirophyllum ferrugineum Ellis, einem typischen Eisenbakterien. Jahrb. f. wiss. Botanik, Bd. 49, 1911.

W. Omeliansky.

Balfour

Frances Maitland.

Geboren am 10. November 1851 in Edinburgh; gestorben am 18. Juli 1882 infolge eines Absturzes in den Alpen. Er erhielt seine Ausbildung in Harrow und von 1870 an in Cambridge, wo er sich mit der Entwicklung des Hühnchens zuerst selbständig wissenschaftlich beschäftigte. Nach Erlangung des Grades eines B. A. ging er 1873 an die vor kurzem von A. Dohrn in Neapel gegründete Zoologische Station, wo er die wenig bekannte Entwickelung der Elasmobranchier in Angriff nahm. Bedeutungsvoll sind namentlich seine Befunde über die Entwickelung der Spinalnerven, besonders die der Nieren; sie wurden von allgemeiner Bedeutung für die Beziehungen dieser Organe zu höheren Vertebraten und besonders zu den Invertebraten. Balfour wußte diese Resultate wohl zu würdigen und verwertete sie auch entsprechend. Nach wiederholten Besuchen in Neapel, wo er seine entwicklungsgeschichtlichen Studien fortsetzte, wurde er 1876 lecturer on animal morphology in Cambridge. Hier vollendete er auch 1878 seine Monographie über die Entwicklung der Elasmobranchier und entfaltete eine fruchtbare Lehrtätigkeit. Daneben unternahm er ein Werk von umfassender und origineller Bedeutung, das im Jahre 1880 bis 1881 erschien unter dem Titel Treatise on comparative embryology. In diesem Werk stellte er zum erstenmal die gesamten bekannten embryonalen Tatsachen kritisch bearbeitet zusammen und hat sich dadurch ein großes Verdienst um den weiteren Ausbau der Entwicklungsgeschichte erworben. 1882 kurz vor seinem für die Wissenschaft zu früh erfolgten Tode, wurde er Professor für Embryologie in Cambridge, nachdem er einen anderen Ruf ausgeschlagen hatte. Nach seinem Tode erschien noch die zweite Auflage seiner Elements of Embryology, die er mit M. Foster zusammen verfaßt hatte.

Weitere Arbeiten sind On the devolopment of elasmobranch fishes London 1878; Studies from the morphological laboratory in Cambridge 1880 bis 1882 2 Bde.

Literatur. *Dicionary of National Biography Bd. 3, 1885.*

W. Harms.

Ballistik.

1. Innere Ballistik: a) Zweck und Ziele. Sprengtechnik und Ballistik. b) Innerballistisches Hauptproblem und dessen Näherungslösungen. c) Bestimmende Eigenschaften einer Pulversorte. d) Wärmegehalt und Arbeitsvermögen. e) Nutzeffekt. f) Spezifisches Volumen. g) Brisanz eines Pulvers. h) Messung der Mündungsgeschwindigkeit. i) Messung des Maximalgasdrucks. k) Beanspruchungen der Waffe. l) Druck. 2. Aeußere Ballistik: a) Definitionen. b) Allgemeine Eigenschaften der Flugbahn im luftleeren und im lufterfüllten Raum. c) Das außerballistische Hauptproblem. d) Sekundäre Probleme. e) Eindringen des Geschosses in das Ziel.

Die Ballistik beschäftigt sich mit der Bewegung des Geschosses und den daran sich anschließenden Fragen auf Grund der Mathematik, Mechanik und Physik. Die sogenannte innere Ballistik verfolgt das Geschoß von dem Moment ab, in dem die Pulverladung innerhalb des Verbrennungsraums der Waffe zur Entzündung gelangt, bis zum Austritt des Geschosses aus der Mündung. Die äußere Ballistik weiterhin von dem letzteren Moment bis zum Eindringen des Geschosses in das Ziel. Die sogenannte experimentelle Ballistik, die es mit den zugehörigen Messungs- und Beobachtungsmethoden zu tun hat, soll im Anschluß einerseits an die innere, andererseits an die äußere Ballistik Erwähnung finden.

1. Innere Ballistik. 1 a) Zweck und Ziele. Sprengtechnik und Ballistik. Die Pulverladung erfährt durch Entzündung oder durch Schlag und Stoß eine chemische Umänderung, bei der große Mengen von gasförmigen Produkten entstehen. Sind diese Gasmengen in einen kleinen Raum eingeschlossen, so wird hierdurch, sowie infolge der bei der chemischen Reaktion auftretenden Wärmeentwickelung ein Druck auf die Umfassungswände ausgeübt. Dieser Druck kann Arbeit leisten. In der eigentlichen Sprengtechnik besteht die von dem Explosivstoff geleistete Arbeit in der Ueberwindung von Kohäsionskräften; daher handelt es sich hier um die Erzeugung von hohen Maximalgasdrücken. die nur sehr kurze Zeit wirken — ein Zweck, der durch brisante Sprengstoffe erreicht wird. Dagegen in der — hier allein zu besprechenden — Gewehr- und Geschützballistik soll der Gasdruck dazu verwendet werden, dem Geschoß innerhalb des Rohrs nach und nach eine lebendige Kraft insbesondere der Translation zu erteilen, ohne daß die Festigkeit des Rohrs und des Geschosses gefährdet wird. Dazu bedarf es wenig brisanter Explosivstoffe. Die Gase sollen nicht zertrümmernd, sondern schiebend auf das Geschoß wirken. Der Zweck ist: bei möglichst niedrigem Maximalgasdruck eine möglichst hohe Mündungsgeschwindigkeit des Geschosses zu erzielen. Dabei versteht man unter „Mündungsgeschwindigkeit" oder „Anfangsgeschwindigkeit" die Geschwindigkeit des Geschosses, die dieses bei dem Austritt aus der Mündung des Rohrs besitzt.

1 b) Das innerballistische Hauptproblem und dessen Nä-

herungslösungen. Würde alles Pulver schon in Gas verwandelt sein, ehe das Geschoß seine Bewegung begonnen hat, so würde der Gasdruck im Verlauf der Geschoßbewegung durch das Rohr nur abnehmen, da der den Gasen zur Verfügung stehende Raum zwischen Seelenboden und Geschoßboden mit dem Vorrücken des Geschosses nach der Mündung zu immer mehr wächst. Würde andererseits das Pulver so langsam abbrennen, daß der Maximalgasdruck erst oder noch nicht eintritt, wenn das Geschoß die Mündung passiert, so würde im allgemeinen nicht die nötige „Mündungsenergie" des Geschosses erhalten werden; auch würde meist die in dem Pulver enthaltene Energie nicht ausgenützt sein; starke Knalle und Feuererscheinungen an der Mündung würden gewöhnlich beobachtet werden. Das Ideal ist eine vollkommene Konstanz des Gasdrucks. Da sich diese nicht erreichen läßt, sucht man wenigstens eine annähernd gleich große Spannung der Gase zu erhalten, wobei die durch die Raumvergrößerung mit Arbeitsleistung bewirkte fortwährende Verminderung des Gasdrucks so gut es geht durch fortwährende Zufuhr neuer Treibgase kompensiert wird, so daß das Pulver gerade vollständig verbrannt ist, wenn das Geschoß die Mündung verläßt. Dazu bedarf es entsprechend langsam verbrennender Pulversorten. Es muß also eine ganz bestimmte Beziehung bestehen zwischen der Schärfe des Pulvers (darüber s. w. u.), der Masse des Pulvers und des Geschosses, dem Rohr- und Geschoßkaliber, der Rohrlänge und dem Inhalt des „Verbrennungsraums", d. h. desjenigen Raumes zwischen Geschoß und Seelenwandung, in dem das Pulver bei seiner Entzündung eingeschlossen ist. Sind diese Größen für eine projektierte Waffe versuchsweise gewählt, so handelt es sich darum, den im Seelenraum des Rohrs herrschenden Gasdruck, die Geschwindigkeit und Beschleunigung des Geschosses, sowie die Temperatur der Pulvergase je in Funktion der Zeit oder auch des Geschoßweges im Rohr zu ermitteln. Darin besteht das innerballistische Hauptproblem. Sekundäre Aufgaben beziehen sich auf die Erwärmung des Rohrs, auf die Inanspruchnahme von Rohr, Verschluß, Lafette, auf die Rotation des Geschosses in den Zügen usw.

Lediglich auf theoretischem Wege mit Hilfe der Thermochemie und Thermodynamik den zeitlichen Verlauf des Gasdrucks, der Geschoßgeschwindigkeit und -Beschleunigung im Rohr, sowie der Gastemperatur aus den chemischen und physikalischen Eigenschaften des verwendeten Pulvers, aus der Pulverladung, der Geschoßmasse, dem Kaliber, der Rohrlänge, dem Verbrennungsraum usw. im voraus zu ermitteln, ist bisher, trotz sehr zahlreicher Ansätze, wenigstens nicht in völlig befriedigender Weise möglich geworden. Die außerordentliche Kompliziertheit des Problems, besonders aber die Mängel in den empirischen Unterlagen sind, wie man sehen wird, die Ursache. Man begnügt sich daher meistens, für die mutmaßliche Verbrennungsweise des Pulvers beim Schuß Anhaltspunkte aus solchen Versuchen zu gewinnen, die mit derselben Pulversorte in der Versuchsbombe ausgeführt werden; ferner supponiert man mitunter eine augenblickliche Verbrennung der ganzen Pulverladung vor Beginn der Geschoßbewegung und ermittelt die nun folgende Bewegung des Geschosses durch das Rohr unter Annahme einer polytropischen Zustandsänderung der Pulvergase mit empirisch gewonnenem Exponenten, wobei man entweder die Rechnung oder graphische Konstruktionen zu Hilfe nimmt; oder endlich führt man Schießversuche mit dem betreffenden Pulver und einer verwandten Waffe aus und schließt mittels gewisser empirischer oder halbempirischer Formeln und Tabellen auf den Verlauf der Geschoßgeschwindigkeit und des Gasdrucks in der projektierten Waffe. Ist die Waffe schon vorhanden, so mißt man jedenfalls den maximalen Gasdruck und die Mündungsgeschwindigkeit des Geschosses; häufig wird auch die Bewegung des Geschosses durch das Rohr oder aber der Rücklauf der Waffe beim Schuß zeitlich registriert; aus solchen Registrierungen erhält man den Verlauf der Geschoßbeschleunigung und damit, zwar nicht den Verlauf des Gasdrucks selbst, der auf das Geschoß wirkt, aber wenigstens den der beschleunigenden Kraft.

1c) Bestimmende Eigenschaften einer Pulversorte. Die ballistischen Eigenschaften der zu verwendenden Pulversorte sind gegeben mit dem Wärmegehalt, dem spezifischen Volumen, dem Kovolumen, den Konstanten der spezifischen Wärme, der sogenannten Kraft des Pulvers, der Dichte, Form, Größe und Oberflächenbeschaffenheit des einzelnen Pulverkorns. Die Verbrennungsgeschwindigkeit eines Pulvers hängt ab von dessen chemischen und physikalischen Eigenschaften und von dem jeweiligen Druck, der bei der Verbrennung des Pulvers im konstanten Raum der Versuchsbombe in seinem Maximalwerte eine Funktion der Ladedichte ist. Dabei versteht man unter Ladedichte das Verhältnis zwischen der Pulverladung in kg zu dem Inhalt des Verbrennungsraumes in l. Auch von der Lagerung der einzelnen Pulverkörner gegeneinander innerhalb des Verbrennungsraumes, ihrer Temperatur und Feuchtigkeit, sowie von der Art und dem Ort der Zündung ist die Verbrennungsweise des Pulvers beim Schuß abhängig.

1 d) Wärmegehalt und Arbeitsvermögen. Der Wärmegehalt einer Pulversorte ist die Wärmemenge (in kg-Kal.), die durch die Umwandlung von 1 kg des Pulvers entsteht, falls Arbeitsleistung ausgeschlossen ist; z. B. für Schwarzpulver 680, für das rauchschwache Blättchenpulver 770, für das nitroglyzerinhaltige Würfelpulver 1190 Kal. pro 1 kg (nach den Angaben des deutschen Militärversuchsamts); dabei ist das entstandene Wasser in Dampfform zu denken. Thermochemisch läßt sich der Wärmegehalt aus der Analyse der Verbrennungsprodukte und unter Berücksichtigung gewisser sekundärer Prozesse berechnen; sicherer wird er kalorimetrisch gemessen. Die Bedeutung dieser Größe liegt darin, daß sich hieraus und mittels der Konstanten der — von der Temperatur abhängigen — spezifischen Wärme die Verbrennungstemperatur der Pulvergase berechnen läßt; diese ist ihrerseits für die Höhe des Gasdrucks und für die Frage der Ausbrennung der Rohre von Bedeutung. Z. B. für Blättchenpulver berechnet sich die Verbrennungstemperatur zu ca. 2100° C. Ferner spielt der Wärmegehalt des Pulvers naturgemäß eine wichtige Rolle bei allen rein theoretischen Näherungslösungen des innerballistischen Problems. In mkg pro 1 kg der Ladung ausgedrückt, wird der Wärmegehalt das „Arbeitsvermögen" des Pulvers genannt. Dieses, mit der Pulverladung (kg) multipliziert, gibt die gesamte „Energie" an, die in der Pulverladung enthalten ist. In dem Moment des Geschoßaustritts aus dem Rohr findet sich diese Energie in folgende Teile zerlegt vor: Ein erster Teil ist auf die lebendige Kraft der Vorwärtsbewegung des Geschosses verwendet. Ein zweiter auf die Energie der Rotation des Geschosses um seine Längsachse. Ein dritter Betrag auf die Bewegungsenergie der verbrannten und etwa noch unverbrannten Pulverladung. Ein vierter auf die Bewegungsenergie, die die Waffe oder ein bestimmter Teil derselben nach rückwärts erhalten hat; samt Erschütterungs- und Vibrationsarbeit an der Waffe usw. Ein fünfter Teil ist die Arbeit zur Ueberwindung des äußeren Luftdrucks, sowie die Energie, die bis dahin auf die vor dem Geschoß befindliche Luft übertragen wurde. Ein sechster ist die Arbeit zur Ueberwindung der Widerstände, die das Geschoß im Rohr erfährt, einschließlich der Einpressungsarbeit. Ein siebenter ist die Wärme, die von den heißen Pulvergasen in das Rohr überging usw. Ein achter die Gesamtwärme der im Seelenraum eingeschlossenen Pulvergase. Um für ein neueres Infanteriegewehr einige Zahlen anzuführen, so betrug die in der Ladung enthaltene Energie 2,762 Kal.; der Wärmeübergang in den Lauf, samt der sonstigen an den Lauf abgegebenen Energie, die in Wärme verwandelt ist, 0,62 Kal.; die Energie der Translationsbewegung des Geschosses im Moment des Geschoßaustritts 0,905 Kal.; die Energie der Rotationsbewegung des Geschosses in demselben Moment 0,004 Kal.; die Rückstoßenergie 0,003 Kal.

1 e) Der Nutzeffekt. Unter „Nutzenergie" pflegt man die Energie der Translationsbewegung des Geschosses im Augenblick des Austritts aus der Mündung zu bezeichnen; diese Energie pro 1 kg Ladung als „Pulververwertung"; und dieselbe Energie im Verhältnis zu der in der ganzen Ladung enthaltenen Energie als „Nutzeffekt" oder „Pulverausnützung". Der Nutzeffekt liegt beim Schuß aus Geschützen und Gewehren zwischen 10 und 35 %. Dieser Begriff spielt naturgemäß in der Ballistik eine weit weniger wichtige Rolle, als bei den Gaskraftmaschinen; so zahlreich auch sonst die Analogien sind, die zwischen der Theorie der Dampfmaschinen und Gasmotoren einerseits und der Theorie der Geschoßbewegung im Rohr des Geschützes oder Gewehrs andererseits bestehen. Man will nicht möglichst an Pulver sparen, da ja jedes Geschütz und selbst jedes Gewehr nur eine verhältnismäßig sehr kleine Anzahl von Schüssen gestattet, im Vergleich zu der Zahl der Kreisprozesse, die eine Gaskraftmaschine zu überdauern hat. Der Zweck ist vielmehr, bei möglichst großer Sicherheit für die Haltbarkeit des Rohrs, also bei möglichst niedrigem Maximalgasdruck ein Maximum der Mündungsenergie zu erreichen; das sogenannte „Druckverhältnis" — der Mittelwert des Gasdrucks dividiert durch den Maximalgasdruck — soll ein Maximum sein.

1 f) Das spezifische Volumen. Das „spezifische Volumen" V_0 ist das Reziproke der Gasdichte; d. h. es ist das Volumen, das die aus 1 kg des Pulvers sich entwickelnden Gase bei 0° C Temperatur und 760 mm Druck einnehmen würden, wobei das entstehende Wasser als Dampf gedacht ist. Auch diese Größe läßt sich thermochemisch berechnen, wird aber sicherer durch Messung erhalten. Der Ausdruck $p_0 \cdot V_0 \cdot \frac{T}{273} = f$, ($p_0$ Atmosphärendruck, V_0 spezifisches Volumen, T Verbrennungstemperatur im absoluten Maß) heißt der spezifische Druck oder die „Kraft" des Explosivstoffs. Das „Kovolumen" a gibt an, welcher Teil der Pulverladung auch nach vollendeter Verbrennung Rückstand bleibt, und zwar Rückstand im weitesten Sinne, also einschließlich der Molekularvolumina des Gases; man pflegt auch diese Größe als eine Konstante der betreffenden Pulversorte anzunehmen. Kennt man die Kraft f des Pulvers, die Ladedichte Δ

und das Kovolumen a, so läßt sich, bei Verbrennung eines Pulvers im konstanten Raum der Versuchsbombe, der Maximaldruck P wenigstens für die neueren festen und flüssigen Explosivstoffe mit genügender Genauigkeit mittels des A b e l s c h e n G e s e t z e s berechnen: P = (f △): (1—a △). Umgekehrt kann man durch Anwendung verschiedener Ladedichten und Messung des Gasdrucks die Größen f und a experimentell ermitteln.

1 g) D i e B r i s a n z. Ueber die Art und Weise, wie die „S c h ä r f e“ oder „B r i s a n z“ eines Pulvers bei dessen Verwendung in einer bestimmten Waffe definiert und folglich ermittelt werden soll, herrscht keineswegs Uebereinstimmung. Die Hauptschwierigkeit liegt darin, daß sich dieselbe Pulversorte, auch bei Anwendung der gleichen Ladedichte, in zwei verschiedenen Waffen sehr verschieden verhalten kann; ferner darin, daß das P i o b e r t sche Gesetz (von der Verbrennung des einzelnen Pulverkorns in äquidistanten Schichten) selbst bei den neueren Pulvern nicht völlig allgemein zutrifft, sondern z. B. von der gegenseitigen Lagerung der Pulverkörner abhängt. Meistens führt man Gasdruck-Registrierungen mit der Versuchsbombe aus und definiert dann die Brisanz des verwendeten Pulvers auf Grund des erhaltenen Druck-Zeit-Diagramms; und zwar einerseits durch die Verbrennungsdauer des betreffenden Pulvers, wobei man annimmt, daß wenn der Druck in der Versuchsbombe konstant geworden ist, die Verbrennung des Pulvers beendigt ist; andererseits durch das Gefälle der Druckkurve in ihrem Wendepunkt; je stärker dieses Gefälle, um so brisanter nennt man das Pulver. Andere suchen einen Brisanzmodulus des Pulvers in dem oben erwähnten Druckverhältnis; ein frühzeitiges Eintreten des Maximaldrucks ist mutmaßlich ein Anzeichen für ein rasches Abbrennen des Pulvers, und da es sich zeigt, daß, je früher unter sonst gleichen Umständen das Maximum des Gasdrucks eintritt um so größer auch der Maximalgasdruck p_1 im Vergleich zum mittleren Gasdruck p_m ist, so schließt man, daß die Verbrennungsgeschwindigkeit des Pulvers mit $\frac{1}{\eta}$ zu- und abnehme (η = Druckverhältnis $p_m : p_1$); man nennt also das Pulver um so brisanter, je kleiner das Druckverhältnis ist. Das Pulver soll „s c h a r f“ heißen, wenn $\eta < 0{,}45$ ist, „m i t t e l“, wenn η zwischen 0,45 und 0,60 liegt; und „m i l d“, wenn $\eta > 0{,}60$ ist. So soll als Stoff am schärfsten Schwarzpulver sein (η höchstens 0,41); darauf das rauchschwache nitroglyzerinhaltige Würfelpulver folgen (η etwa 0,52); dann das reine Schießwolle-Blättchenpulver (η etwa 0,65). Uebrigens läßt sich gegen diese Kennzeichnung der Brisanz manches einwenden. Endlich ist versucht worden, die Verbrennungszeit eines Pulvers beim Schuß selbst zu messen.

Der Gasdruck in der Waffe steigt beim Vorrücken des Geschosses im Rohr meistens rasch bis zu seinem Maximum an und fällt alsdann langsamer bis zum Mündungsgasdruck ab; z. B. bei neueren Infanteriegewehren liegt das Maximum zwischen 3000 und 4000 kg/qcm. Unter sonst je gleichen Umständen und bis zu gewissen Grenzen ist der Maximalgasdruck im allgemeinen um so größer, je größer die Pulverladung oder das Geschoßgewicht oder die Ladedichte und je kleiner das Kaliber gewählt wird. Die Mündungsgeschwindigkeit des Geschosses nimmt unter je gleichen Umständen im allgemeinen zu, wenn die Pulverladung oder die Ladedichte oder — bis zu einer gewisssen Grenze — die Lauflänge größer oder aber das Geschoßgewicht kleiner gewählt wird.

1 h) D i e M e s s u n g d e r M ü n d u n g s g e s c h w i n d i g k e i t. Die M ü n d u n g s g e s c h w i n d i g k e i t läßt sich mit den neueren Hilfsmitteln auf etwa 0,2 % messen. Die Apparate, die zur Messung dieser Geschwindigkeit dienen, sind in den verschiedenen Fällen und in den einzelnen Ländern recht verschieden. Der einzige Apparat, mit dem die Geschwindigkeit direkt ermittelt wird, ist das ballistische Pendel. Die anderen Apparate sind, wenn man von der Geschwindigkeitsbestimmung durch Messung des Wellenwinkels am fliegenden Geschoß absieht — durchweg indirekter Natur; sie sind Zeitmesser. Meistens wird der B o u l e n g e - Apparat verwendet: Vor der Mündung ist ein Draht oder ein Kupferstreifen ausgespannt, der in dem Stromkreis eines ersten Elektromagneten sich befindet. In 50 oder 100 m Entfernung davon ist ein Drahtgitter oder eine Kontaktscheibe aufgestellt und liegt im Stromkreis eines zweiten Elektromagneten. Wird durch das Geschoß der Mündungsdraht oder Mündungskupferstreifen durchrissen, so wird der erste Elektromagnet unmagnetisch; ein an ihm hängender Stab wird freigelassen und fällt herab. Wird auch das zweite Drahtgitter durchrissen oder wird die Kontaktscheibe von dem aufprallenden Geschoß zurückgedrückt, so verliert auch der zweite Elektromagnet seinen Magnetismus; ein zweiter Stab fällt und schlägt auf einem Teller auf. Dadurch wird eine Spannfeder frei; ein Messer springt vor und erzeugt in dem vorbeifallenden ersten Stab eine Marke. Man erhält hieraus die zugehörige Fallhöhe, folglich auch die Fallzeit, und nach Subtraktion einer gewissen Instrumenten-Konstanten diejenige Zeit, die das Geschoß gebraucht hat, um die Messungsstrecke von 50 oder 100 m zurückzulegen. Durch Division dieser Zeit in die Messungsstrecke gewinnt man die mittlere Geschoßgeschwindigkeit V_{25} bezw.

V_{50} auf dieser Strecke. Durch Rechnung wird alsdann V_{25} bezw. V_{50} auf die Mündung (V_0) reduziert. Der Apparat mißt ein Zeitintervall von z. B. 0,01 sec. mit einem mittleren quadratischen Fehler der Einzelmessung im Betrag von $\pm$ 0,00004 sec.; kleinere Zeitintervalle als 0,001 sec. lassen sich mit dem Apparat nicht wohl mehr messen. In England wird auch der Tram-Chronograph von J. Smith benutzt, bei dem die Zeitregistrierung durch eine geaichte Stimmgabel und durch Registrier-Elektromagnete erfolgt, deren Anker mit Schreibfedern versehen sind. Häufig wünscht man die Geschwindigkeit in nächster Nähe der Mündung selbst auf kurzer Strecke von 1 m oder 20 cm zu messen. Hierzu dient der Siemenssche Funkenchronograph, mittels dessen z. B. ein Zeitintervall von 0,001 sec. mit einem wahrscheinlichen Fehler der Einzelmessung von $\pm$ 0,25% sich ermitteln läßt; ferner der Kondensator-Chronograph von Sabine-Rodakovic, der Polarisations-Chronograph von Crehore und Squier usw.; auch durch photographische Registrierung kann die Geschwindigkeit auf sehr kurzer Strecke, bei völlig freiem Flug des Geschosses, gemessen werden.

1 i) Messung des Maximalgasdrucks. Zur Messung des Maximalgasdrucks, der in der Waffe beim Schuß auftritt, wird meistens der Noblesche „Stauchapparat" angewendet: das Rohr ist, gewöhnlich an der Stelle des Pulverraums, mit einer Seitenbohrung versehen. Es wird ein gut eingeschliffener, leicht saugend gehender Stahlstempel in die Bohrung eingesetzt, auf diesen ein genau abgemessener Kupferzylinder und hierauf eine Halteschraube. Durch den Gasdruck wird der Stempel vorgedrückt und der Kupferzylinder zusammengepreßt. Man mißt die Stauchung des Kupferzylinders und erhält daraus, auf Grund der Aichung mittels einer Presse oder eines Fallhammers, den Maximalgasdruck; freilich in Verbindung mit mehreren zum Teil noch nicht völlig gesetzmäßig erforschten Fehlerquellen. Bei Geschützen wird die Stauchvorrichtung häufig in einem sogenannten „Kruppschen Meßei" untergebracht, das in den Pulverraum gelegt wird.

Wenn man den zeitlichen Verlauf des Gasdrucks im Rohr durch Messung zu erhalten wünscht, benützt man den Sébertschen „Rücklaufmesser". Dieser gestattet, die Wege, die das möglichst reibungsfrei gelagerte Rohr beim Schuß nach rückwärts zurücklegt, in Funktion der Zeit zu gewinnen. Durch zweimaliges Differentiieren erhält man hieraus den Verlauf der Geschwindigkeit und Beschleunigung des Rohrs, somit die beschleunigende Kraft, die auf das Rohr wirkt, und auf Grund des Schwerpunktssatzes dasselbe für das Geschoß. Die Registrierung erfolgt mittels einer schwingenden Stimmgabel, oder es schreibt eine am Lauf angebrachte und mit diesem zurückgehende Schreibfeder auf einer rotierenden berußten Trommel; neuerdings wird beim Gewehr auch photographische Registrierung angewendet. Andere Methoden sind in größerer Anzahl vorgeschlagen und versucht worden. Alle diese Registriermethoden leiden jedoch an dem Uebelstande, daß sie nicht den Verlauf des Gasdrucks selbst angeben, sondern den der beschleunigenden Kraft: man erhält nur die Differenz zwischen dem Gasdruck und dem Widerstand, der innerhalb des Rohrs in Richtung der Seelenachse auf das Geschoß wirkt, in Funktion der Zeit oder des Wegs. Es ist jedoch bis jetzt nicht möglich geworden, den Einpressungswiderstand, den Zug- und Reibungswiderstand einwandfrei zu messen. Und doch ist insbesondere der Widerstand, den das Geschoß bei seinem Einpressen in den gezogenen Teil des Rohrs erfährt, von bedeutendem Einfluß auf die Verbrennungsweise des Pulvers und damit auf die Höhe des Maximalgasdrucks und der Mündungsgeschwindigkeit.

1 k) Beanspruchungen der Waffe. Die Kenntnis des Gasdruckverlaufs, insbesondere des Maximalgasdrucks ist vorzugsweise für die Frage nach der Haltbarkeit des Rohrs, ferner für die Konstruktion der Verschlüsse usw. notwendig. Zurzeit werden die Beanspruchungen eines einfachen oder beringten Rohrs oder eines Stahldrahtrohrs mit Hilfe der statischen Festigkeitstheorie ermittelt, doch hat man diesbezügliche dynamische Untersuchungen begonnen. Außer den Beanspruchungen des Rohrs und Verschlusses auf Druck und Zug sind an dieser Stelle die kräftigen Transversalverbiegungen zu erwähnen, die der Lauf eines Gewehrs beim Schuß periodisch erfährt. Die Transversalschwingungen erfolgen sowohl im Grundton, wie in den ersten Obertönen; die Knoten kann man zum Teil durch Aufstreuen von Sand auf einen Kartonstreifen nachweisen, der auf dem Lauf befestigt wird. Für mehrere Gewehrexemplare wurde der Verlauf der Schwingungen photographisch untersucht; diese Schwingungen beginnen schon vor dem Austritt des Geschosses aus der Mündung und sind, wenigstens bei einläufigen Gewehren, die Hauptursache davon, daß nach dem Geschoßaustritt die Anfangstangente der Geschoßflugbahn im allgemeinen nicht mit der verlängerten Seelenachse übereinstimmt, wie sie vor dem Schuß gerichtet war, daß vielmehr beide einen Winkel miteinander bilden (s. w. u.). Außer den Transversalschwingungen dürften auch Longitudinalschwingungen, ferner elastische Kaliberänderungen und endlich, bei gezogenen Läufen, Torsionsschwingungen vorhanden sein; doch

sind diese weiteren Beanspruchungen des Rohrs bis jetzt nicht experimentell nachgewiesen worden.

Verwickelter noch als die Bewegungsvorgänge bei einem Einzellader sind diejenigen bei einer Selbstladewaffe. Das Funktionieren einer Selbstladewaffe, das Zurück- und Vorgehen des Verschlußkolbens, das Auswerfen der leeren Hülse, das Einschieben der neuen Patrone, das etwaige Heraustreten von Pulvergasen aus dem Verschluß usw. kann mit Hilfe der elektrischen Kinematographie im einzelnen verfolgt werden, wobei sich etwaige Fehler der Waffe kundgeben, die sonst verborgen bleiben können.

1 l) Der Drall. Durch die Züge soll dem Langgeschoß eine Rotation um die Längsachse (mit 3000 bis 4000 Touren pro Sekunde bei neueren Gewehren) zum Zweck der Stabilität beim Flug durch die Luft und damit eine erhöhte Treffähigkeit verliehen werden. Bilden in der ebenen Abwickelung der inneren Seelenoberfläche die Zugkanten parallele Geraden, so heißt der Drall konstant („Drallwinkel" = Winkel zwischen diesen Geraden und der Seelenachse des Rohrs); anderenfalls veränderlich, „Progressivdrall". Die Gewehre besitzen meist konstanten Drall; bei Geschützen wird nicht selten Progressivdrall, und zwar entweder der parabolische Drall oder der Drall gleicher Winkelzunahme angewendet. Der konstante Drall kann den Nachteil mit sich bringen, daß das Geschoß anfangs zu stark auf Drehung beansprucht wird, daß also die Sicherheit der Führung des Geschosses in den Zügen leidet; beim Progressivdrall werden die großen anfänglichen Leistendrücke vermieden, andererseits werden die Geschoßleisten fortwährend verstellt und daher abgeschliffen. Der Enddrallwinkel bei Progressivdrall, bezw. der Drallwinkel bei konstantem Drall, wird so gewählt, daß beim Flug des Geschosses die Geschoßachse möglichst in der Tangente der Schwerpunktsbahn bleibt, daß also ein ruhiger Flug des Langgeschosses durch die Luft gewährleistet ist. Eine Beziehung zwischen Enddrallwinkel, Geschoßlänge, Kaliber usw., die dazu dient, für einen einzelnen Fall den erforderlichen Enddrallwinkel im voraus zu ermitteln oder wenigstens in enge Grenzen einzuweisen, heißt ein Drallgesetz. Solche wurden verschiedentlich aus der Stabilitätsbedingung der Kreiseltheorie abgeleitet; übrigens ist es bis jetzt nicht gelungen, ein für jede beliebige Geschoßform zutreffendes, genügend allgemeines Drallgesetz aufzustellen.

2. Aeußere Ballistik. 2 a) Definitionen. Das Geschoß habe nunmehr die Mündung verlassen und sei in die freie Luft ausgetreten. Zunächst mögen einige Benennungen angeführt werden, die in der äußeren Ballistik üblich sind.

Der Winkel zwischen der Anfangstangente der Flugbahn und der Horizontalen heißt „Abgangswinkel". Er ist im allgemeinen nicht identisch mit dem „Erhöhungswinkel", d. h. dem Winkel zwischen der verlängerten Seelenachse des Rohrs in dessen Ruhelage vor dem Schuß und der Horizontalen; vielmehr bilden (s. w. oben) die Anfangstangente und die verlängerte Seelenachse einen Winkel miteinander, den sogenannten „Abgangsfehlerwinkel"; dieser wird als positiv oder negativ bezeichnet, je nachdem der Abgangswinkel größer oder kleiner als der Erhöhungswinkel ist; meistens trifft das Erstere zu; bei Gewehren heißt der Abgangsfehlerwinkel häufig „Vibrationswinkel", da bei diesen die Laufschwingungen die Hauptursache seiner Entstehung bilden. Die Vertikalebene durch die ruhende Seelenachse heißt „Schußebene"; ihre Schnittlinie mit dem durch die Mündungsmitte gedachten Horizont („Mündungshorizont") heißt „Schußrichtung". Unter „Visierwinkel" versteht man den Winkel zwischen der Seelenachse vor dem Abfeuern und der Visierlinie (d. h. z. B. beim Gewehr der Linie nach dem Ziel über Visierkimme und Korn). Unter „Geländewinkel" den Winkel zwischen der auf das Ziel gerichteten Visierlinie und der Horizontalen; der Visierwinkel ist also auch die Differenz zwischen Erhöhungswinkel und Geländewinkel; wenn nichts anderes gesagt wird, ist der Geländewinkel = Null anzunehmen. „Richtungsebene" ist die Vertikalebene durch die Visierlinie; „Richtungslinie" die Schnittlinie dieser Ebene mit dem Mündungshorizont. Unter „Schußweite" hat man, wenn nichts anderes bemerkt wird, die horizontale Entfernung zwischen der Mündungsmitte und dem im Mündungshorizont zu denkenden Auftreffpunkt des Geschosses zu verstehen. „Auffallwinkel" ist der spitze Winkel zwischen der Flugbahntangente in diesem Auftreffpunkt und der Horizontalen; „Endgeschwindigkeit" ist die Bahngeschwindigkeit, d. h. die Geschwindigkeit des Geschosses in seiner Bahn, die zu dem im Mündungshorizont gelegenen Auftreffpunkt gehört; „Scheitelgeschwindigkeit" die Geschwindigkeit des Geschosses im Scheitelpunkt der Geschoßbahn.

2 b) Allgemeine Eigenschaften der Flugbahn im luftleeren und im lufterfüllten Raum. Wäre der Widerstand der Luft nicht vorhanden, so wäre die Bahn des Geschosses eine Parabel mit vertikaler Achse; Endgeschwindigkeit gleich Anfangsgeschwindigkeit; Auffallwinkel gleich Abgangswinkel. Denkt man sich von

demselben Punkt aus mit derselben Munition unter den verschiedensten Abgangswinkeln geschossen, so hat man eine Schar von Parabeln; die Maximalschußweite beim Abgangswinkel 45°. Alle Parabeln sind von einem einzigen Paraboloid, dem sogenannten „Sicherheitsparaboloid" umhüllt, deren Pfeilhöhe gleich der halben Maximalschußweite ist; alle Scheitel liegen auf einem Ellipsoid; alle Brennpunkte auf einer Kugel usw. Mit Rücksicht auf die Erdkrümmung und die allgemeine Gravitation ist die Bahn des Geschosses eine Ellipse, deren einer Brennpunkt im Erdmittelpunkt liegt.

Tatsächlich wirkt jedoch der Luftwiderstand. Durch diesen wird die Flugbahn derart abgeändert, daß die Schußweite und die Endgeschwindigkeit verkleinert, die Gesamtflugzeit vergrößert, der Scheitel der Flugbahn mehr nach dem Auftreffpunkt hin verlegt wird. Der Punkt kleinster Bahngeschwindigkeit liegt dabei nicht im Scheitel — wie bei der Bahn im luftleergedachten Raum —, sondern jenseits des Scheitels, und zwischen diesem Punkt und dem Scheitel befindet sich der Punkt stärkster Krümmung der Bahn. Denkt man sich die Flugbahn beliebig weit unter den Mündungshorizont hinab fortgesetzt, so nähert sie sich mehr und mehr einer vertikalen Asymptote, die Bahngeschwindigkeit einem Grenzwert („Grenzgeschwindigkeit"), bei dem das Gewicht des Geschosses gleich dem Luftwiderstand ist. Die Horizontalkomponente der Geschoßgeschwindigkeit ist nicht konstant, wie im leeren Raum, sondern nimmt stetig ab; die Vertikalkomponente ist auf dem „aufsteigenden Aste" der Flugbahn (d. h. zwischen Abgangspunkt und Scheitel) größer als auf dem „absteigenden Aste" (d. h. zwischen Scheitel und Auffallpunkt) in zwei Punkten der Bahn, die gleich hoch über dem Mündungshorizont liegen; die Flugzeit vom Abgangspunkt bis zum Scheitel ist kleiner als die Flugzeit vom Scheitel bis zum Auftreffpunkt im Mündungshorizont; der spitze Auffallwinkel ist größer als der Abgangswinkel.

Die Verzögerung durch den Luftwiderstand pflegt man proportional dem Geschoßquerschnitt, dem Tagesluftgewicht, einem Koeffizienten der Geschoßform, einer gewissen Funktion der Geschwindigkeit des Geschoßschwerpunktes und umgekehrt proportional dem Geschoßgewicht anzunehmen; (bemerkt möge werden, daß in der Ballistik noch die Rechnung mit dem statischen, technischen Maßsystem üblich ist). Unter „Tagesluftgewicht" versteht man das Gewicht eines cbm Luft am Versuchstage. Das Verhältnis des Geschoßgewichts zum Geschoßquerschnitt wird häufig als „Querschnittsbelastung" bezeichnet; je größer diese ist, um so weniger wird unter sonst gleichen Umständen das Geschoß durch den Luftwiderstand beeinflußt. Z. B. das deutsche Infanteriegeschoß M. 88 verliert, bei 4° Abgangswinkel, durch den Luftwiderstand nicht weniger als 72 % seiner Schußweite; dagegen die 80 kg-Granate des 21 cm-Mörsers bei 38° Abgangswinkel nur 2 % von der Schußweite im leeren Raum.

Die erwähnte Geschwindigkeitsfunktion wird empirisch meistens dadurch ermittelt, daß man für eine Reihe von Geschoßgeschwindigkeiten die Geschwindigkeitsverluste des Geschosses entlang eines möglichst kurzen und gestreckten Teils einer sehr flachen Flugbahn mißt. Man begnügt sich zurzeit, für die Flugbahnberechnungen rein empirische Funktionen zu verwenden, die auf diese Weise gewonnen sind. Auf theoretischem Wege, mit Hilfe der Aerodynamik, ein genügend allgemeines und zugleich praktisch anwendbares Luftwiderstandsgesetz für die großen Geschoßgeschwindigkeiten aufzustellen, ist trotz sehr zahlreicher Versuche bis jetzt nicht gelungen. Die bedeutsamsten Winke über die Richtung, in der sich die Forschung bezüglich des Luftwiderstandes weiterzubewegen haben wird, sind durch die Machsche Photographie des fliegenden Geschosses samt den das Geschoß umgebenden Luftschlieren, den Wellen und Wirbeln der Luft, geliefert worden. Solche Wellen gehen von der Spitze und von dem hinteren Ende aus (Kopfwelle, Schwanzwelle), ebenso auch von jeder Unebenheit der Geschoßmantelfläche, z. B. von den Führungsringen. Aber nur so lange die Geschoßgeschwindigkeit größer als die Schallgeschwindigkeit ist, wird das Geschoß von den Wellen begleitet. Der Wellenwinkel hängt in einfacher Weise mit der Geschoßgeschwindigkeit zusammen. Die Wirbel entstehen zum Teil schon an den vorderen Teilen des Geschosses, vorzugsweise jedoch auf dessen Rückseite. Die Anwendung des Machschen Interferenzrefraktometers gestattet, auch in quantitativer Hinsicht die Luftverdichtungen und -verdünnungen in der Nähe des fliegenden Geschosses zu bestimmen. Wenn die Kopfwelle am Ohr des Beobachters angelangt ist, übt sie eine Knallwirkung aus. Man hat folglich zweierlei Knalle zu unterscheiden: den Waffenknall, der davon herrührt, daß die Pulvergase, deren Druck vor dem Geschoßaustritt noch mehrere Hundert Atmosphären beträgt, mit großer Geschwindigkeit aus der Mündung des Rohres austretend heftig gegen die äußere Luft stoßen; und den Geschoßknall, der von der Geschoßkopfwelle mitgeführt wird, bis die Geschwindigkeit des Geschosses unter die Schallgeschwindigkeit herabgesunken ist.

2 c) Das äußerballistische Hauptproblem. Unter Berücksichtigung des Luftwiderstands die Koordinaten eines beliebigen Flugbahnpunktes, die Geschoßgeschwindigkeit in diesem Punkt, samt ihren Komponenten, und die Flugzeit des Geschosses bis zu diesem Punkt zu berechnen, macht das äußerballistische Hauptproblem aus. Dabei wird vorausgesetzt, daß das Geschoß mit seiner Längsachse dauernd in der Bahntangente liegt; und als gegeben sind dabei angenommen: z. B. Anfangsgeschwindigkeit, Abgangswinkel, Geschoß (Kaliber, Geschoßmasse, Form des Geschosses) und das Tagesluftgewicht; oder: Anfangsgeschwindigkeit, Abgangswinkel, Schußweite oder dgl. Zur Beurteilung des Genauigkeitsgrades, mit dem eine Flugbahn mittels der neueren Formel- und Tabellensysteme aus Anfangsgeschwindigkeit, Abgangswinkel, Geschoß- und Tagesluftgewicht berechnet werden kann, seien 4 Beispiele angeführt: Errechnet wurden die Schußweiten 4049, 4959, 6472, 7773 m; gegenüber den beobachteten Schußweiten betrugen die entsprechenden Fehler — 61, — 52, + 24, — 52 m oder — 1,5, — 1,0, + 04, — 0,7 %.

An die Berechnung der Flugbahn und ihrer einzelnen „Elemente“ (Schußweite, Endgeschwindigkeit, Auffallwinkel, Gesamtflugzeit, Scheitelabszisse, Scheitelordinate, Scheitelgeschwindigkeit, Koordinaten eines beliebigen Flugbahnpunktes mit zugehöriger Tangentenrichtung, Flugzeit und Bahngeschwindigkeit), die Aufstellung von Schußtafeln für den praktischen Gebrauch und die Lösung der zahlreichen Einzelaufgaben, die in der Praxis vorkommen, gliedern sich eine Reihe von sekundären Problemen an, die sich auf die einseitigen und die zufälligen Geschoßabweichungen, auf die Kreiselbewegungen des rotierenden Langgeschosses und auf das Eindringen des Geschosses in das Ziel beziehen.

2 d) Sekundäre Probleme. Konstante oder einseitige Abweichungen können eintreten: durch Aenderungen in der Tagesluftdichte am gleichen Ort, in der Höhenlage des Schießplatzes, im Geschoßgewicht, der Pulverladung, dem Abgangswinkel; ferner durch Wind, durch Aufstecken des Seitengewehrs als Bajonett beim Gewehr, durch schiefen Räderstand beim Geschütz bezw. durch Verkanten des Gewehrs, durch Erdrotation und durch Geschoßrotationen. Die Abweichungen durch Erdrotation kommen, wie die Rechnung zeigt, neben den zufälligen Abweichungen, die von Schuß zu Schuß auftreten, nicht mehr in Betracht. Die meteorologischen Einflüsse können recht bedeutend sein; ebenso die Abweichungen durch schiefen Räderstand und durch Geschoßrotation. Diese beiden letzteren Abweichungen werden am Geschütz ausgeschaltet. Speziell die Abweichung durch Rotation des Langgeschosses hat ihre Hauptursache in folgendem: Die Geschoßachse sucht ihre Richtung im Raum beizubehalten; folglich entsteht bald ein von Null verschiedener Winkel zwischen Bahntangente und Geschoßachse; und da die Resultante des Luftwiderstandes im allgemeinen nicht durch den Schwerpunkt des Geschosses geht, entsteht eine langsame Präzessionsbewegung der Geschoßachse um den Schwerpunkt; die Spitze des Geschosses wendet sich (bei Rechtsdrall) nach rechts, und das Geschoß wird als Ganzes nach der rechten Seite abgetrieben. Die näheren Umstände können hier nicht besprochen werden.

Auch wenn die erwähnten einseitigen Abweichungen sämtlich ausgeschaltet sind oder wenn die Waffe genau auf das Ziel „eingeschossen ist“, schlagen bekanntlich nicht alle Geschosse wirklich in das punktförmig gedachte Ziel ein, sondern sie zeigen zufällige Abweichungen. Die Einschläge gruppieren sich um den mittelsten Treffpunkt derart, daß die kleineren Abweichungen häufiger vorkommen, als die großen. In den Schußtafeln sind meist die durch Beobachtung ermittelten wahrscheinlichen Abweichungen nach der Höhe (oder Länge) und nach der Seite vermerkt. Daraus läßt sich berechnen, wieviel Treffer bei gegebener Schußzahl in einer gegebenen Zielfläche zu erwarten sind. Die Anwendung des Gaußschen Fehlergesetzes hat sich auch bei seiner Anwendung auf die Treffwahrscheinlichkeit und die zahlreichen hierzu gehörigen Einzelprobleme wohl bewährt.

2 e) Eindringen des Geschosses in das Ziel. Beim Eindringen des Geschosses in das ausgedehnte Ziel treten manche Wirkungen auf, die zunächst auffallend erscheinen, da unser mechanisches Empfinden an kleine Geschwindigkeiten gewöhnt ist, und die sich durch die bedeutende Stoßenergie der Geschosse, durch die großen Trägheitswiderstände, die ihm entgegengesetzt werden, sowie durch die Kürze der Zeiten erklären, um die es sich beim Eindringen und Durchdringen von Geschossen handelt. Speziell die sogenannte Explosivwirkung moderner Infanteriegeschosse in flüssigen und halbflüssigen Körpern geht vor sich, wie wenn im Innern des Körpers eine Sprengladung zur Entzündung gebracht würde: das Geschoß stößt gegen die nächsten Partikeln des Körpers; dadurch werden diese selbst gewissermaßen zu Projektilen, sie stoßen ihrerseits ihre Nachbarn, und so pflanzt sich der Druck im Bereich einer gewissen Druckzone nach allen Seiten fort. Manche Durchschießungs- und Eindringungsvorgänge lassen sich in ihren Einzelheiten

mittels der elektrischen Kinematographie verfolgen. Einige allerdings unsichere Berechnungen beziehen sich auf das Durchschlagen von Panzerplatten, sowie auf die Tiefe des Eindringens von Geschossen in Erde, Holz usw und die zugehörige Eindringungszeit, und endlich auf die in Mauerwerk usw. gebildete Höhlung.

Literatur. *Ein ziemlich vollständiges Literaturverzeichnis findet sich in dem Referat „Ballistik" der Enzyklopädie der mathematischen Wissenschaften, Bd. 4, Nr. 18, Leipzig. — Ferner in* **Cranz, Poppenberg und Becker,** *Lehrbuch der Ballistik, Leipzig 1910/12, B. G. Teubner, Bd. 1 bis 4. Dort sind auch die wichtigsten Spezialwerke und die Fachzeitschriften zusammengestellt.*

C. Cranz.

Barchan.

Bogen- oder Sicheldüne ist eine im Windschatten (Leeseite) konkave, sichelförmig gebogene Düne (vgl. den Artikel „Atmosphäre").

Barometer.

1. Allgemeines über Quecksilber-Barometer: a) Prinzip des Quecksilber-Barometers. b) Reinheit des Quecksilbers. c) Luftfreies Vakuum, d) Einfluß des Quecksilberdampfes. e) Kapillardepression. f) Temperaturkorrektion. g) Schwere-Korrektion. h) Genauigkeit der Barometerablesungen. 2. Spezielle Formen des Quecksilber-Barometers: a) Gefäßbarometer. b) Heber-Barometer. c) Gefäß-Heber-Barometer. d) Wage-Barometer. 3. Barometer mit anderen Flüssigkeiten. 4. Metall-Barometer: a) von Bourdon. b) Aneroid-Barometer von Vidi. 5. Registrierende Barometer: a) Quecksilber-Barograph. b) Aneroid-Barograph. 6. Thermo-Hypsometer. 7. Barometrische Höhenmessung.

1. Allgemeines über Quecksilber-Barometer. 1a) Prinzip des Quecksilber-Barometers. Das Quecksilber-Barometer wurde im Jahre 1643 von Evangelista Torricelli erfunden. In seiner einfachsten Form besteht es im wesentlichen aus einer an einem Ende geschlossenen Glasröhre von ca. 80 cm Länge, die mit Quecksilber gefüllt und in umgekehrter Stellung in ein gleichfalls mit Quecksilber gefülltes Gefäß gesetzt wird. Das Quecksilber sinkt dann in der Röhre so weit zurück, bis sein hydrostatischer Druck dem äußeren Luftdruck das Gleichgewicht hält. Die Höhe der Quecksilbersäule mißt dann diesen Luftdruck (vgl. den Artikel „Luftdruck").

1b) Reinheit des Quecksilbers. Das verwendete Quecksilber muß vollkommen rein sein, weil unreines Quecksilber ein anderes spezifisches Gewicht besitzt, und besonders auch, weil es am Glase haftet. Eine mechanische Reinigung von Staub wird erzielt, indem man das Quecksilber durch einen Papiertrichter laufen läßt, dessen Spitze mit einer Nadel durchstochen wurde, oder noch besser, indem man es durch Leder hindurchpreßt. Fett wird durch Ausschütteln mit etwas Kali- oder Natronlauge oder Benzol und Alkohol und wiederholtes Nachschütteln mit Wasser beseitigt. Fremde Metalle zieht man durch Schütteln des Quecksilbers mit verdünnter Salpetersäure oder Lösungen von Eisenchlorid oder doppeltchromsaurem Kali aus, worauf stets mit destilliertem Wasser nachgewaschen werden muß. Schwer flüchtige Metalle entfernt man auch durch Abdestillieren des Quecksilbers, am besten im Vakuum (vgl. den Artikel „Physikalische Technik"). Eine andere Methode, reines Quecksilber zu erhalten, ist die, daß man dasselbe erst in Zinnober verwandelt und dann aus diesem reduziert. Das in destilliertem Quecksilber stets enthaltene Quecksilberoxyd wird durch Schütteln mit verdünntem Schwefelammonium fortgeschafft.

1c) Luftfreies Vakuum. Es ist ohne weiteres ersichtlich, daß der über der Quecksilberkuppe befindliche leere Raum (das Torricellische Vakuum) keine Luftreste enthalten darf, da solche sofort ein Sinken der Kuppe und damit einen Fehler in der Messung herbeiführen würden. Erfahrungsgemäß bleiben aber stets geringe Luftmengen am Glase haften, welche sich später im Vakuum sammeln, wenn man nicht besondere Vorsichtsmaßregeln ergreift. Seit alters her erhitzt man deshalb die gefüllte, noch nicht umgedrehte Röhre bis zum Siedepunkt des Quecksilbers, wodurch der größte Teil der Luft herausgetrieben wird. Taupenot (1857) wandte den Kunstgriff an, daß er über dem offenen Röhrenende ein Vakuum erzeugte, wodurch erreicht wird, daß das Quecksilber bereits bei 300° und ohne Stoßen siedet, was wegen des sonst häufigen Springens der Röhren von Wert ist. Wild bediente sich des gleichen Prinzips nach der in Figur 1 dargestellten Anordnung. Durch eine Luftpumpe A wird das Quecksilberreservoir C evakuiert, mit welchem die zu füllende Barometerröhre K in Verbindung steht. Diese letztere wird nur angewärmt, während man das Quecksilber in C zum Kochen bringt und sodann durch Neigen der Vorlage in die Röhre laufen läßt. Durch dies Verfahren wird ein sehr reines Vakuum erhalten und zugleich die Gefahr des Zerspringens der Röhre sehr verringert.

Ein anderes Verfahren, nach welchem man ganz ohne Auskochen eine ziemlich

luftfreie Barometerröhre erhält, hat Bogen angegeben: Man läßt aus der ganz gefüllten und mit dem Finger (am besten mit Hilfe eines Kautschuküberzuges) geschlossenen Röhre nach dem Umkehren einige Zentimeter Quecksilber austreten und das entstandene Vakuum durch Hin- und Herneigen und Schütteln der Röhre durch dieselbe mehrmals hindurchwandern, wobei alle Luftbläschen von dem Vakuum aufgenommen werden. Das Verfahren muß einige Male wiederholt werden, und das Quecksilber auf etwa 50° erwärmt sein.

Die Luftfreiheit einer Barometerröhre kann man prüfen, indem man das Quecksilber durch Neigen der Röhre an ihr oberes Ende (vorsichtig!) anschlagen läßt, wobei ein metallischer, klirrender Ton zu hören sein muß; die geringste Luftblase bewirkt sogleich, daß der Anschlag stumpf wird. Wie weiter unten noch besprochen werden wird, läßt sich durch mehrmaliges Ablesen des Barometerstandes bei geänderter Größe des Vakuums ein etwaiger Luftinhalt desselben nicht nur feststellen, sondern auch in Rechnung setzen. Ein äußerst empfindliches Mittel zur Prüfung des Vakuums geben die elektrischen Entladungserscheinungen, worauf hier nur hingewiesen werden kann.

1d) Einfluß des Quecksilberdampfes. Auch das reinste Vakuum enthält doch immer noch Quecksilberdämpfe, wenn auch von sehr geringer Spannkraft. Die hierdurch bedingte Depression der Quecksilberkuppe ist außerordentlich geringfügig und kann in der Praxis überall vernachlässigt werden. Sie beträgt bei 20° 0,02 mm, bei 40° 0,03 mm.

1e) Kapillardepression. Ein anderer Fehler entsteht durch die kapillare Depression des Quecksilbers in der Röhre. Er ist von der Weite der Röhre abhängig, aber auch von den Kapillarkräften des Quecksilbers, welche sich leider schon durch geringe Verunreinigungen stark ändern können. Kohlrausch hat aus den Beobachtungen von Mendelejeff und Gutkowski die folgende Tabelle berechnet:

Kapillardepression des Quecksilbers in einer Glasröhre.

Durchmesser mm	Höhe des Meniscus mm 0,6	1,0	1,4	1,8
4	1,22	1,98		
6	0,41	0,78	1,21	
8	0,20	0,38	0,56	0,77
10		0,20	0,29	0,37
12		0,10	0,15	0,19

Für größere Röhrendurchmesser kann man ohne Rücksicht auf die Höhe des Meniscus nach Bravais annehmen:

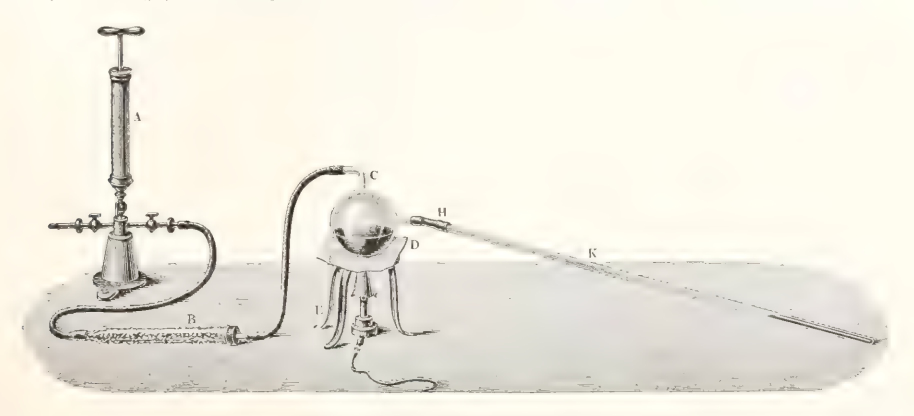


Fig. 1. Füllung der Barometerröhre nach Wild.

Durchmesser mm	Kapillardepression mm
10	0,32
12	0,19
14	0,12
16	0,07
18	0,04
20	0,025

Beträgt die Röhrenweite mehr als 16 mm, so kann also diese Korrektion vernachlässigt werden.

1f) Temperaturkorrektion. Da der Luftdruck nicht eigentlich durch die Höhe, sondern durch das Gewicht der Quecksilbersäule gemessen wird, das letztere aber wegen des großen Ausdehnungskoeffizienten des Quecksilbers stark von der Temperatur abhängt, so ist es notwendig, den abgelesenen Barometerstand auf Quecksilber von 0° zu reduzieren. Der Betrag dieser Korrektion ist sehr erheblich und darf niemals vernachlässigt werden. Bedeutet h die bei t° gemessene Höhe der Quecksilbersäule, so ist die Höhe für 0° C:

$$h_0 = h - 0{,}000181 . t . h$$

Meist benutzt man jedoch eine Tabelle, bei welcher zugleich auch auf die Ausdehnung

des zur Messung dienenden Maßstabes Rücksicht genommen ist, so daß nur die Differenz Quecksilber minus Maßstab angebracht wird. In der folgenden Tabelle ist als Ausdehnungskoeffizient des letzteren 0,000019 angenommen (gültig für Messing). Für einen Glasmaßstab wären sämtliche Zahlen der Tabelle um 0,008 t zu vergrößern. Das Vorzeichen dieser Temperaturkorrektion richtet sich nach dem Vorzeichen der abgelesenen Quecksilbertemperatur; ist diese positiv, so ist die Korrektion negativ, und umgekehrt.

Reduktion der Barometerablesung auf 0° Quecksilbertemperatur.

t	Abgelesener Stand (mm)				
	680	700	720	740	760
0°	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5°	0,55	0,57	0,58	0,60	0,62
10°	1,10	1,13	1,17	1,20	1,23
15°	1,65	1,70	1,75	1,80	1,85
20°	2,20	2,27	2,33	2,40	2,46
25°	2,75	2,84	2,92	3,00	3,08
30°	3,30	3,40	3,50	3,60	3,69

Wegen dieser Temperaturkorrektion muß jedes Quecksilberbarometer mit einem Thermometer verbunden sein (thermomètre attaché), welches eine möglichst genaue Bestimmung der Temperatur des Quecksilbers im Barometer gestattet.

1 g) Schwerekorrektion. Endlich ist es üblich, an der Ablesung der Quecksilberbarometer die sogenannte Schwerekorrektion anzubringen. Da sich nämlich die Schwere mit der geographischen Breite ändert, so repräsentiert dieselbe Quecksilbersäule von 0° in den verschiedenen Breiten auch etwas verschiedene Druckkräfte. Man reduziert daher die Ablesungen auf Normalschwere (gültig für 45° Breite) nach der Formel

$$b = h\,(1 - 0{,}0026 \cos 2\varphi)$$

Diese Korrektion beträgt an den Polen und am Aequator etwa 2 mm (in 45° Breite 0). Statt sie nach der Formel zu berechnen, kann man sie auch angenähert aus der folgenden, für b = 760 mm geltenden Tabelle entnehmen:

Reduktion des Quecksilberbarometers auf Normalschwere

Breite (Korr. +)	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
Korrekt. (mm)	0,00	0,34	0,67	0,98	1,27	1,51	1,70	1,85	1,94	1,97
Breite (Korr. —)	45	40	35	30	25	20	15	10	5	0

Da die Schwere auch mit der Höhe abnimmt, wird für große Seehöhen noch eine weitere, stets negative Korrektion von geringem Betrage nötig, die man der folgenden, für mittlere Luftdruckverhältnisse gültigen Tabelle entnehmen kann:

Reduktion auf Schwere im Meeresniveau

Höhe (m)	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000
Korrektion (mm, —)	0,00	0,12	0,23	0,31	0,36	0,40	0,42

Es sei besonders darauf aufmerksam gemacht, daß diese beiden Schwerekorrektionen der Natur der Sache nach nur am Quecksilberbarometer, nicht aber an den weiter unten zu besprechenden Aneroidbarometern anzubringen sind, welche letztere den Luftdruck ja durch ihre elastischen Kräfte unabhängig von der Schwere messen. Wegen dieses verschiedenen Verhaltens der beiden Barometerarten hat man wiederholt vorgeschlagen, die Schwerekorrektion durch Vergleichung beider empirisch zu bestimmen und hieraus die örtliche Schwere zu berechnen. (Vgl. auch die unten folgenden Ausführungen über das Thermo-Hypsometer).

Zu Vergleichszwecken, namentlich in der synoptischen Meteorologie, reduziert man den Luftdruck meist auf den Meeresspiegel, worauf hier aber nicht näher eingegangen werden kann.

1 h) Genauigkeit der Barometerablesungen. Diejenigen Barometer, welche ohne Vergleichung mit anderen Instrumenten, nur unter Berücksichtigung aller im vorangehenden besprochenen Korrektionen den wahren Luftdruck zu ermitteln gestatten, nennt man Normalbarometer. Es wird hierzu vorzugsweise das weiter unten beschriebene Gefäß-Heber-Barometer benutzt. Jedes meteorologische Beobachtungsnetz besitzt an seinem Zentralinstitut ein solches Hauptbarometer, und durch Vergleichung mit diesem werden die Korrektionen der Stationsbarometer empirisch bestimmt. Die mehrfach angestellten Vergleiche der Hauptbarometer der verschiedenen Zentralinstitute untereinander geben ein Bild von der Genauigkeit, mit der die Messung des Luftdruckes praktisch möglich ist. Im Anfange betrugen die größten Abweichungen der verschiedenen Hauptinstrumente noch ca. 1 mm, bei der letzten Vergleichung (1904) nur noch 0,3 mm

2. Spezielle Formen der Quecksilberbarometer. 2a) Gefäß-Barometer. In Figur 2 sind die drei Haupttypen des Barometers dargestellt, nämlich das Gefäßbarometer, das Heberbarometer und das Gefäß-Heber-Barometer, Das Gefäß-Barometer entspricht fast ganz der ursprünglichen Anordnung des Torricellischen Versuchs. Um Quecksilber zu sparen, macht man meist den Hauptteil der Röhre ziemlich eng und erweitert nur das obere Ende, um die Kapillardepression zu verringern. Wenn auf Genauigkeit kein Wert gelegt wird, vernachlässigt man die Niveauänderung im „Gefäß", dessen Durchmesser dann möglichst groß zu wählen ist (Phiolen-Barometer). Für genauere Ablesungen ist dies aber nicht mehr zulässig. Man verfährt dann nach verschiedenen Methoden. In der in Figur 3 dargestellten Konstruktion wird die ganze neben der Barometerröhre angebrachte Skala, die unten in einer Spitze endigt, in der Vertikalen so verschoben, daß die Spitze genau auf dem unteren Quecksilberniveau endigt. Diese zuerst von Regnault angegebene Spitzeneinstellung ist sehr genau, da man die Berührung der Spitze mit dem Quecksilber mit Hilfe der Spiegelung sehr scharf beobachten kann. Statt der Skala kann man auch das Gefäß selber oder wenigstens seinen Boden in der Vertikalen beweglich machen, was Ramsden bereits 1786 anwendete.

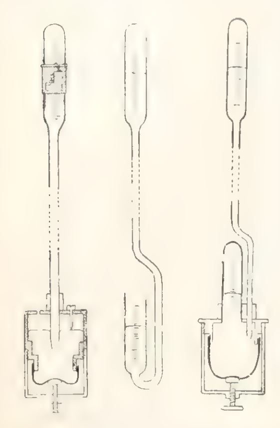


Fig. 2. Die 3 Barometertypen.

Verbessert wurde diese Methode namentlich durch Fortin (1820), dessen auch für den Transport eingerichtete Modelle noch heute eine große Verbreitung haben. Bei diesem Fortinschen Barometer besitzt das Gefäß einen Lederboden, der durch eine von unten angreifende Stellschraube gehoben oder gesenkt werden kann; hierdurch wird vor der Ablesung das untere Quecksilberniveau gerade zur Berührung mit einer fest angebrachten elfenbeinernen Spitze gebracht (Fig. 4). Die Barometerröhre ist hier zunächst von einem Messingrohr umgeben, welches die Teilung trägt. Für die Ablesung ist, wie Figur 5 zeigt, dies Messingrohr weiter von einer verschiebbaren Hülse umgeben, die den Nonius trägt. Ebenso wie das Hauptrohr besitzt sie 2 Ausschnitte, durch welche man das obere Ende der Quecksilbersäule erblickt. Die Hülse muß dann so eingestellt werden, daß die Horizontalebene, die durch die oberen Ränder der Ausschnitte geht, gerade die Quecksilberkuppe berührt.

Bisweilen trägt man nach einem Vorschlag von W. Weber die Teilung auch auf einem Glasstreifen auf (Fig. 6), deren eine Hälfte A B amalgamiert ist und als Spiegel dient. Der Beobachter erblickt in ihm das Bild seines eigenen Auges, welches er bei der Ablesung in eine solche Höhe zu bringen hat, daß der die Quecksilberkuppe tangierende Teilstrich das Bild der Pupille gerade halbiert.

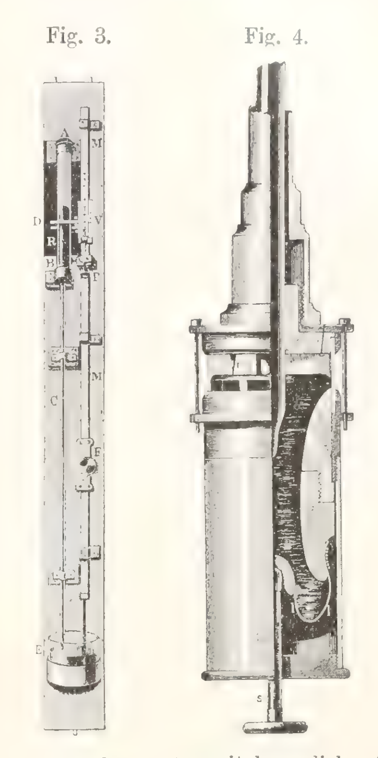


Fig. 3. Gefäßbarometer mit beweglicher Skala.
Fig. 4. Unteres Ende des Fortinschen Gefäßbarometers.

Das Prinzip der Einstellung auf eine Spitze ist noch bei vielen anderen Konstruktionen angewendet worden, z. B. in dem fast ganz aus Glas bestehenden Barometer des Glasbläsers Bodin, bei welchem das ganze (gläserne) Gefäß mittels einer Ringschraube höher oder tiefer geschraubt werden kann, bis der Quecksilberspiegel gerade die Spitze eines dornartigen Glasansatzes an der Röhre berührt. Trotz der eleganten Lösung der Aufgabe hat sich dies Barometer wegen seiner Zerbrechlichkeit nicht eingebürgert.

Die Unbequemlichkeit der zweimaligen Einstellung (unten und oben) wird vermieden bei den gewöhnlichen Gefäßbarometern (Fig. 7), wie sie auf den meteorologischen Stationen zur Verwendung gelangen. So ist in der Mehrzahl der österreichischen

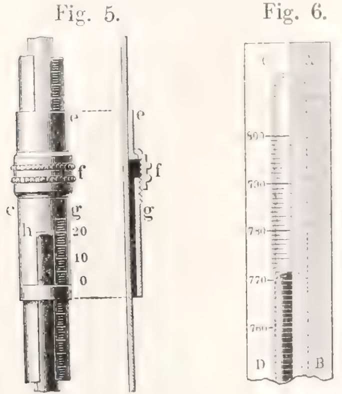


Fig. 5. Ablesungsvorrichtung des Fortinschen Barometers.
Fig. 6. Spiegelteilung nach Weber.



Fig. 7. Gefäßbarometer.

Stationen ein solches Gefäßbarometer mit unbeweglichem Boden von Kapeller in Gebrauch. Die aus der Veränderung des unteren Niveaus entspringende Korrektion wird bei ihm rechnerisch angebracht, was ja ohne weiteres möglich ist, wenn das Verhältnis der Querschnitte von Röhre und Gefäß bekannt ist.

Die Anbringung dieser Korrektion wird erspart bei dem sogenannten Kew-Barometer oder „Gefäßbarometer mit reduzierter Skala" welches speziell in Figur 7 dargestellt ist. Hier ist die Skala bereits entsprechend dieser Korrektion geändert. Dies Barometer ist an den Stationen des preußischen Beobachtungsnetzes in Gebrauch. Eine Abart dieses Gefäßbarometers mit reduzierter Skala bildet das Marinebarometer, bei dem die Röhre an irgendeiner Stelle stark verengt ist. Hierdurch wird das „Pumpen", d. h. das Auf- und Abschwanken des Quecksilbers in der Röhre verringert, welches sonst im Seegange jede Ablesung unmöglich macht. Solche Marinebarometer werden z. B. von der Deutschen Seewarte an die Schiffe ausgeteilt, welche für sie Beobachtungen anstellen.

Alle derartigen Gefäßbarometer mit festem Boden sind natürlich nur relative Instrumente, da jede Aenderung der Quecksilbermenge im Gefäß eine Standänderung hervorruft. Es muß also immer erst durch Vergleichung mit absoluten Instrumenten die Standkorrektion dieser Barometer ermittelt werden.

2b) Heber-Barometer. Namentlich um den Einfluß der Kapillardepression zu beseitigen, hat schon Boyle (1694) das Heber-Barometer (Fig. 2, Mitte) konstruiert, bei dem die Röhre umbiegt und in einem kürzeren offenen Schenkel endigt, so daß die Kapillardepression an beiden Quecksilberniveaus die gleiche ist und sich also aufhebt. Gay-Lussac (1826) schloß auch den kurzen Röhrenschenkel bis auf eine seitlich angebrachte kapillare Luftöffnung, welche Luft, aber nicht Quecksilber passieren läßt, wodurch einmal der freie Quecksilberspiegel gegen Staub geschützt und andererseits erreicht wird, daß man das Instrument umkehren kann, ohne Quecksilber zu verschütten (Fig. 8). Um zu verhindern, daß beim Wiederumkehren des Barometers Luft in den längeren Schenkel eintritt, hat Bunten an diesen Barometern die in Figur 9 abgebildete Einrichtung getroffen (Buntensche Spitze), die auch sonst vielfach verwendet wird.

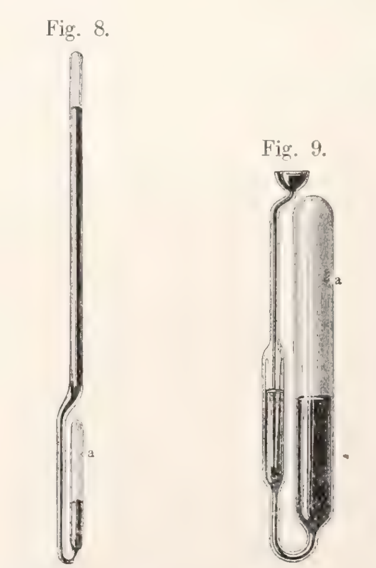


Fig. 8. Gay-Lussacs Heber-Barometer.
Fig. 9. Buntensche Spitze.

Die Anbringung der Skala ist bei den Heber-Barometern sehr verschieden. Entweder ist die Skala verschiebbar, so daß ihr Nullpunkt auf den unteren Quecksilberspiegel eingestellt wird, oder sie befindet sich fest auf dem Montierungsbrett, und das ganze

Barometerrohr wird so weit nach oben oder unten verschoben, bis das untere Niveau in gleicher Höhe mit dem Nullpunkt steht. Kapeller legte den Nullpunkt der fest angebrachten Skala mitten zwischen die beiden Niveaus und ließ die Teilung von hier ab nach beiden Seiten wachsen, so daß die beiden Ablesungen addiert werden mußten. Bei dem in Figur 10 dargestellten Modell endlich befindet sich die Teilung auf der Glasröhre selber; am kürzeren Schenkel bei B bemerkt man einen Hahn, der beim Transport geschlossen wird, nachdem man durch Neigen das Vakuum beinahe (wegen der Ausdehnung nicht ganz) ausgefüllt hat.

Fig. 10. Heber - Barometer mit geteilter Glasröhre.

Fig. 11. Wild-Fueßsches Gefäß-Heber-Barometer (Normalbarometer).

Es hat sich gezeigt, daß der Hauptzweck der Heber-Barometer, nämlich die Ausschaltung der Kapillardepression, doch nur teilweise erreichbar ist; denn einmal ist dieselbe im Vakuum nicht die gleiche wie an der Luft (bei Röhren von wenigstens 8 mm Weite beträgt der Unterschied allerdings höchstens 0,1 mm), zweitens aber wird die der Luft ausgesetzte Quecksilberoberfläche und noch mehr das Glas an dieser Stelle bald stark verunreinigt, wodurch die Adhäsion des Quecksilbers am Glase sehr erheblich geändert werden kann. Aus diesem Grunde und auch wegen der Unbequemlichkeit der doppelten Ablesung haben die Heber-Barometer jetzt keine große Verbreitung mehr.

2c) Gefäß-Heber-Barometer. Dagegen hat sich eine Kombination der beiden Prinzipien des Gefäß- und des Heber-Barometers sehr bewährt (Fig. 2 rechts), und es ist wohl nur der Kostspieligkeit dieser Modelle zuzuschreiben, daß sie auf den meteorologischen Stationen im allgemeinen nicht eingeführt worden sind, sondern hauptsächlich nur als Normalinstrumente zu Eichungen Verwendung finden. Das gegenwärtig am meisten gebräuchliche Wild-Fueßsche Normalbarometer geht auf das „Stand-Heber-Barometer" von Kupffer (1830) zurück. Dies war so eingerichtet, daß mit Hilfe des beweglichen Bodens des Gefäßes das Quecksilber im langen Röhrenschenkel immer auf einen bestimmten Teilstrich eingestellt wurde, so daß das Vakuum eine stets gleiche Größe hatte. Der Vorteil dieses Verfahrens war der, daß ein etwaiger Luftrest im Vakuum sich leichter und exakter in Rechnung stellen ließ.

Auch wurde großes Gewicht darauf gelegt, daß das Quecksilber vor jeder Ablesung gehoben war, wodurch eine stark gekrümmte, ziemlich gleich bleibende Kuppe erzielt wurde. Kurz vor seinem Tode modifizierte Kupffer das Modell, indem er die etwas umständliche Ablesung vereinfachte und das Instrument mit einer Holzfassung umgab, die sich aber, wie sich später herausstellte, stark verzog. In dieser Form wurde das Barometer durch Wild an den russischen Stationen eingeführt. Eine weitere Verbesserung wurde 1873 von Turretini nach Wilds Angaben angebracht, und aus diesem Modell entstand schließlich das in Figur 11 abgebildete Wild-Fueßsche Gefäß-Heber-Barometer, das jetzt vielfach als Normalbarometer benutzt wird. Als „Normalbarometer" wollte Wild eigentlich ein anderes, sehr kompliziertes und kostspieliges Instrument bezeichnet sehen, das sich aber nicht einbürgerte, da sich die erwarteten Vorzüge nicht bestätigten. Die Figur stellt links den oberen, rechts den unteren Teil (diesen in etwas größerem Maßstab) dar. Der Zylinder C ist mit Quecksilber gefüllt und von unten durch einen Lederbeutel geschlossen, den man mittels der Schraube G heben und senken kann. In diesen Zylinder ragen zwei Röhren hinein; die weitere Röhre B endigt in der

Erweiterung O, welche übrigens durch eine Scheidewand (oberhalb S) abgeschlossen ist; die engere Röhre A befindet sich an der Seite von B, durchsetzt die Erweiterung O, in welche sie eingeschmolzen ist, biegt dann um und nimmt die gleiche Breite wie B an. Die Röhre B steht nur durch eine kleine seitliche, mit der Kappe S zu verschließende Oeffnung in Verbindung mit der Außenluft. Auf der die Glasröhre umgebenden Messinghülse befindet sich die Skalenteilung, deren Nullpunkt unten liegt. Bei der Ablesung hebt man zunächst das Quecksilberniveau in B bis zum unteren Rande eines kleinen Visiers, dessen drei Teilstriche vorher am unteren Ende der Skala — der mittelste auf den Nullpunkt — eingestellt worden sind. Dann befindet sich also das untere Quecksilberniveau in Höhe des Nullpunktes. Man verschiebt nun die Noniushülse N (am oberen Ende des Barometers) so, daß sich der Rand des in der Hülse angebrachten Spalts in gleicher Höhe mit der Quecksilberkuppe befindet, worauf man die Ablesung vornehmen kann. Soll das Instrument auf kürzere Strecken

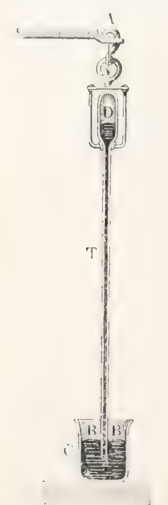


Fig. 12. Wagebarometer.

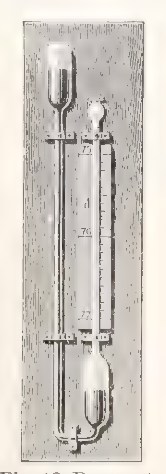


Fig. 13. Barometer mit gemischter Füllung nach Huyghens.

in zusammengesetztem Zustande transportiert werden, so wird das Quecksilber im Rohre B ganz gehoben, die Oeffnung bei S verschlossen, und das Instrument umgekehrt. Die Versendung auf weitere Strecken geschieht in zerlegtem Zustande, ohne daß eine neue Füllung notwendig wird. Zu diesem Zweck wird in umgekehrter Lage nach Abnahme des Skalenrohres vom Gefäß D und nach Lösung der Mutter F der Stahlkonus E mitsamt den beiden eingekitteten Röhren aus D herausgehoben und nach Abnahme von S das Quecksilber aus dem Schenkel B abgelassen, während der längere Schenkel A gefüllt bleibt. Die beiden Rohre werden dann mitsamt dem Konus E abgesondert vom übrigen Instrument verpackt, damit im Falle eines Bruches das ausfließende Quecksilber nicht die Metallteile beschädigt.

Die Verschiebbarkeit des Index am kürzeren Röhrenschenkel ermöglicht es, die von Arago und Kupffer zuerst angegebene Probe auf Lufthaltigkeit des Vakuums („Vakuumprobe") anzustellen. Stellt man nämlich den unteren Index um 10 mm höher und liest aufs neue ab, so muß die Ablesung genau 10 mm mehr ergeben, wenn das Vakuum wirklich ganz leer ist. Enthält es aber Luft, so macht sich die Verringerung des Volumens durch Erhöhung ihrer Spannkraft geltend, und es wird eine Depression des Quecksilbers beobachtet, welche sich noch vermehrt, wenn das Niveau aufs neue um 10 mm höher gelegt wird. Mit Hilfe der so gemessenen Depressionen des Quecksilbers kann man dann den Gesamteinfluß der vorhandenen Luft rechnerisch ohne Schwierigkeit ermitteln, worauf hier aber nicht näher eingegangen werden kann.

2d) Wagebarometer. Auf einem ganz anderen Prinzip als die bisherigen beruht das schon 1760 von Morland erfundene Wagebarometer (Fig. 12), bei dem die Barometerröhre an dem einen Ende eines Wagebalkens befestigt ist. Der Druck auf den Punkt A hängt dabei von dem Gewicht des Quecksilbers ab, welches in der Röhre oberhalb BB enthalten ist (falls man das Gewicht der Glasröhre nicht in Betracht zieht). Die Aenderungen des Luftdrucks werden durch das zum Aequilibrieren erforderliche Gegengewicht oder durch die Neigungsänderung des Wagebalkens bestimmt. Das Prinzip dieser Wage-Barometer wird vorzugsweise bei registrierenden Instrumenten verwendet (siehe weiter unten).

3. Barometer mit anderen Flüssigkeiten. Theoretisch läßt sich natürlich jede beliebige Flüssigkeit als Barometerfüllung verwenden, nur werden die Rohrlängen entsprechend dem geringeren spezifischen Gewicht der Flüssigkeiten meist sehr groß. Ein Alkoholbarometer hat 13 m, ein Wasserbarometer ca. 10 m, ein Glyzerinbarometer 8,2 m Höhe. Ein Wasserbarometer hat schon 1654 Otto von Guericke auf dem Reichstage in Regensburg vorgezeigt. Später hat Daniell es dadurch verbessert, daß er das Wasser darin mit einer Oelschicht bedeckte; gleichwohl konnte er nicht verhindern, daß das Wasser Luft absorbierte und es im Vakuum wieder abgab. Erheblich vorteilhafter sind in dieser Hinsicht die Glyzerinbarometer, welche mehrfach zu Demonstrationszwecken gebaut worden sind; so besaß bis vor kurzem die Deutsche Seewarte in

Hamburg ein solches Glyzerinbarometer von Jordan.

Figur 13 stellt ein von Huyghens konstruiertes Barometer mit gemischter Füllung dar. Die Barometerröhre erweitert sich oben bei b (Vakuum) und unten bei c, wo eine Flüssigkeit von geringerem spezifischen Gewicht (gefärbtes Wasser oder Weingeist) auf das Quecksilber aufgegossen ist. Das Gefäß c geht in eine engere, oben offene Röhre d über. Hat nun das Rohr d einen n mal kleineren Querschnitt wie b und c, so muß beim Sinken des Quecksilbers um x mm die farbige Flüssigkeit in d um nx mm steigen. Für n = 20 und die Flüssigkeiten Quecksilber und Wasser ergibt sich ein Steigen des Wassers um 5,88 mm, wenn der Luftdruck in Wahrheit um 1 mm sinkt.

Mendelejeff hat ein sehr empfindliches Differentialbarometer konstruiert, dessen Füllung aus Naphtha besteht. Dasselbe gestattet den Unterschied des Luftdrucks an zwei Orten zu messen, deren Vertikalabstand nicht mehr als 1 m beträgt. P. Reinbot hat zwei interessante Formen des Naphthabarometers vorgeschlagen, auf die wir aber nicht näher eingehen können. Kohlrausch, Hefner-Alteneck, West u. a. haben Apparate zur Messung geringer Luftdruckschwankungen vorgeschlagen. Vgl. auch „Variometer" unter 13 a im Artikel „Luftdruck".

4. Metallbarometer. Die Metallbarometer bestehen aus einer luftleeren, elastischen Metallbüchse, deren vom jeweiligen Luftdruck abhängige Zusammenpressung auf einen Zeiger übertragen wird. Sie besitzen



Fig. 14. Metallbarometer von Bourdon.

nur eine empirische Skala, ihre Korrektion muß also durch Vergleichung mit einem Quecksilberbarometer ermittelt werden. Vermöge elastischer Nachwirkungen ändert sich bisweilen die Korrektion im Laufe der Zeit, so daß eine häufige Kontrolle nötig ist. Diese Barometer besitzen meist auch eine Temperaturkorrektion, d. h. sie ändern den Stand bei einer Temperaturänderung ohne Aenderung des Luftdrucks. Jedes Metallbarometer muß auf diese Temperaturkorrektion hin geprüft und, wenn nötig, korrigiert werden. Die Versuche der Mechaniker, diese Korrektion zu beseitigen, haben indessen schon so viel Erfolg gehabt, daß die besten Instrumente gegenwärtig fast frei davon sind. Vor der Ablesung müssen alle Metallbarometer durch Klopfen leicht erschüttert werden, damit der Einfluß der Reibung beseitigt wird.

4a) Das Metallbarometer von Bourdon (Fig. 14). Es besteht aus einer evakuierten dünnwandigen Metallröhre ABC mit elliptischem Querschnitt, die im Punkt B befestigt ist. Bei Zu- bzw. Abnahme des Außendrucks nähern bzw. entfernen sich ihre Enden A und C voneinander; diese Verschiebungen werden mittels eines Zahnrades auf den Zeiger übertragen.

4b) Das Aneroid-Barometer (Holosteric-Barometer) von Vidi. Es wurde von Breguet vervollkommnet (Fig. 15) und

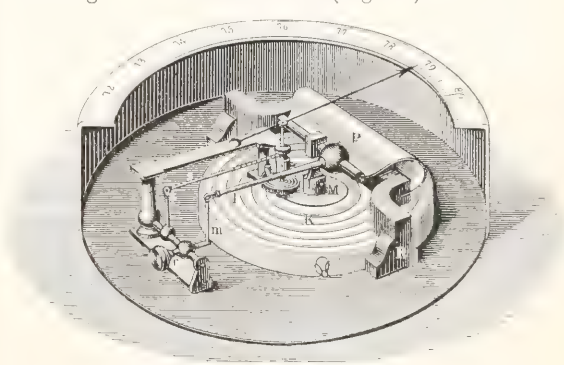


Fig. 15. Aneroid-Barometer (Holosteric-Barometer) von Vidi.

enthält statt der Bourdon-Röhre eine gleichfalls evakuierte runde Metalldose (K). Der kreisförmig gewellte Boden derselben biegt sich bei wechselndem Luftdruck mehr oder weniger nach innen. Da die Dose selbst zu schwach ist, um den ganzen Luftdruck zu tragen, wird sie durch die starke Stahlfeder P, die diesem entgegenwirkt, gespannt. Die Uebertragung der Bewegung auf den Zeiger ist aus der Figur ersichtlich.

5. Registrierende Barometer (Barographen). 5a) Quecksilber-Barograph. Die nächstliegende Methode, das gewöhnliche Heber-Barometer zum Registrieren einzurichten, besteht darin, daß im offenen Heberarm ein Schwimmer angebracht wird, dessen Vertikalbewegungen durch eine mehr oder weniger komplizierte Uebertragung einem

Schreibstift mitgeteilt werden; der letztere schreibt dabei meist auf einem sich nach unten bewegenden Papierstreifen und bewegt sich selbst dabei nach rechts und links (geradlinig rechtwinklige Koordinaten).

Nach einer anderen, von Fueß ausgearbeiteten Methode läßt man auf dem oberen Quecksilberniveau im Vakuum ein Stückchen Eisen schwimmen; dasselbe wird von einem Magneten angezogen, der am Ende eines ausbalanzierten Hebels angebracht, das Barometerrohr fast berührt und sich daher stets in die Höhe der oberen Quecksilberkuppe einstellt. Um zu verhindern, daß das Quecksilber in seiner einmaligen Stellung haften bleibt und sich erst nach einer größeren Aenderung des Luftdruckes mit einem Ruck losreißt, wird bei diesem Instrument sowohl wie bei den anderen Quecksilber-Barographen zweckmäßig mit Hilfe einer von Sprung angegebenen Einrichtung („Sprungscher Klopfer") in regelmäßigen Zeitintervallen eine leichte Erschütterung herbeigeführt.

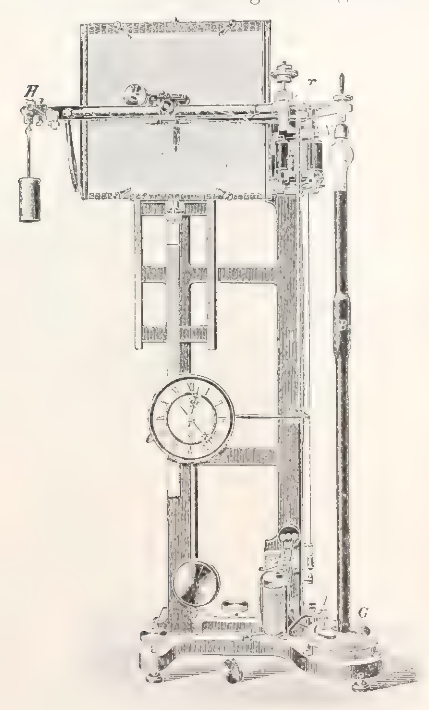


Fig. 16. Sprung-Fueßscher Laufgewichts-Barograph.

Vorzugsweise ist aber das Prinzip des Wagebarometers, und zwar schon von Secchi 1857 zum Registrieren verwendet worden. Der Schreibstift befindet sich hier am Ende eines langen, am Wagebalken befestigten Zeigers. Einen durch Empfindlichkeit ausgezeichneten Wagebarograph hat Krajewitsch konstruiert. Die größte Vollkommenheit hat dieses Instrument in dem Sprung-Fueßschen Laufgewichts-Barograph (Fig. 16) erreicht. Das Barometer hängt an dem einen Arm der Wage, während der andere quer vor der ebenen Tafel mit dem Registrierpapier steht. Diese Tafel wird durch ein Uhrwerk mit gleichförmiger Geschwindigkeit in der Vertikale bewegt. Auf dem langen Arm der Wage, welcher im wesentlichen aus einer horizontalen, mit Schneckengewinde versehenen Achse besteht, befindet sich nun das Laufgewicht in Gestalt eines kleinen Wagens, der sich verschiebt, wenn die Achse sich dreht. Vom Uhrwerk her erhält nun diese Achse durch elektrische Vermittelung fortwährend kleine Anstöße zur Drehung, bald nach der einen und bald nach der anderen Seite, um die Reibungswirkungen zu beseitigen. Erfolgt aber ein Ausschlag, so gehen diese Anstöße so lange vorzugsweise nach einer Seite, bis das Gleichgewicht wieder hergestellt ist.

Mit dem Laufgewicht ist die Schreibfeder verbunden, welche auf diese Weise auch hier in einem rechtwinkligen, gradlinigen Koordinatensystem registriert. Das Verhältnis der beiden Wagearme ist so gewählt, daß die Aenderungen des Barometerstandes gerade in 5 oder 10facher Vergrößerung aufgezeichnet werden.

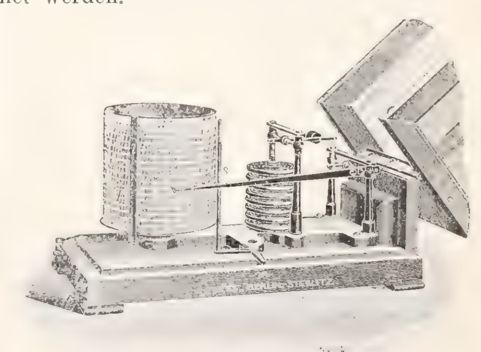


Fig. 17. Aneroid-Barograph von Fueß.

5b) Aneroid-Barograph. Viel gebräuchlicher, weil billiger als die vorangehenden, sind die nach dem Prinzip der Metallbarometer gebauten Barographen, die namentlich in der ihnen von Richard gegebenen Form allgemeine Verbreitung gewonnen haben. Figur 17 zeigt einen solchen Aneroid-Barograph von Fueß, der äußerlich nur wenig von dem Modell Richards abweicht. Meist werden hier mehrere übereinander gesetzte Aneroid-Dosen verwendet, bei welchen die dem Luftdruck entgegenwirkenden Stahlfedern im Innern angebracht sind. Für die Zwecke der Luftfahrt begnügt man sich

meist mit nur zwei Dosen, da sonst die Ausschläge zu groß werden. Die Bewegung wird auf einen Hebelarm übertragen, der an der Spitze die Schreibfeder trägt und auf einer durch ein inneres Uhrwerk wöchentlich einmal sich herumdrehenden Trommel schreibt. Wegen der Kreisbewegung, welche die Feder um die Achse des Hebels ausführt, ist hier die Luftdruckkoordinate nicht mehr geradlinig. Steffens läßt deswegen die hängend angebrachte Feder nicht wie in Figur 17, sondern an derjenigen Seite der Trommel schreiben, welche der Drehungsachse des Schreibhebels gerade entgegengesetzt ist (ganz links in der Figur), wodurch wiederum geradlinige Koordinaten erhalten werden.

6. Thermo-Hypsometer. Man hat auch den Umstand, daß der Siedepunkt des Wassers vom Luftdruck abhängt, dazu benutzt, um umgekehrt aus dem genau bestimmten Siedepunkt den Luftdruck zu berechnen. Solche „Siedethermometer“ oder „Hypsometer“ sind von v. Danckelmann, Hecker und Grützmacher konstruiert worden. Figur 18 zeigt das von dem letzteren gebaute Instrument. Da es sich um eine sehr genaue Bestimmung des Siedepunktes handelt, so wird die Thermometerkugel nicht in das siedende Wasser selbst, sondern nur in den Dampf hineingebracht, auch wird das ganze Thermometerrohr noch von einem Dampfmantel umschlossen, welcher nur den für die Ablesung gebrauchten Teil der Skala heraussehen läßt. Das Instrument ist speziell für Reisezwecke gebaut, wozu es sich besonders gut eignet, weil es viel leichter ist als ein Quecksilberbarometer. Mohn hat nachgewiesen, daß die Genauigkeit dieser Hypsometer fast dieselbe ist wie die der Reisebarometer. Um den Barometerstand auf 0,1 mm genau zu erhalten, muß die Siedetemperatur auf ca. $\frac{1}{300}{}^0$ C genau gemessen werden, was mit den genauesten Instrumenten gerade noch möglich ist. Die folgende Tabelle gibt die Siedetemperaturen für die in Betracht kommenden Luftdrucke:



Fig. 18. Thermo-Hypsometer.

Luftdruck (mm)	760	707,3	657,7	611,0	567,1	526,0	487,3	451,0	417,0
Siedetemperatur (C)	100	98	96	94	92	90	88	86	84

Wegen des erwähnten Vorteils der Leichtigkeit haben diese Instrumente auf schwierigen Reisen bei Expeditionen häufig Verwendung gefunden. Da die Messung hier ebenso wie diejenige mit Metallbarometern frei von der Schwerekorrektion ist, hat Mohn vorgeschlagen, durch gleichzeitige Ablesung von Hypsometern und Quecksilberbarometern die Schwere zu messen, und Hecker hat auf diese Weise auf zwei Reisen (1901 von Lissabon nach Rio de Janeiro und 1904 bis 1905 durch das Mittelmeer über Australien nach San Franzisko und zurück nach Yokohama) die ersten einwandfreien Schweremessungen auf See erhalten, wo Pendelmessungen wegen der Schwankungen des Schiffes unmöglich sind.

7. Barometrische Höhenmessung. Schon bei dem ersten empirischen Nachweis der Luftdruckabnahme mit der Höhe ist von Pascal vorgeschlagen worden, diese Erscheinung zu benutzen, um Höhendifferenzen zu messen. Hieraus hat sich im Laufe der Zeit die „barometrische Höhenmessung“ entwickelt, welche zwar an Genauigkeit den Nivellements im allgemeinen erheblich nachsteht, aber unter gewissen Umständen, so namentlich auf Forschungsreisen, oft die einzige Möglichkeit der Höhenbestimmung bildet.

Die Formel, nach welcher der Luftdruck mit der Höhe abnimmt, lautet:

$$\log \text{nat} \left(\frac{p_0}{p} \right) = \frac{h}{H(1+\alpha t)}$$

(p_0 Luftdruck an der bekannten unteren, p an der zu messenden oberen Station, h der gesuchte Höhenunterschied, t die Mitteltemperatur der Luftsäule, $\alpha = \frac{1}{273}$ der Ausdehnungskoeffizient der Gase, $H = 7991$ eine Konstante, die sogenannte Höhe der homogenen Atmosphäre). Ueber die Ableitung dieser Formel siehe den Artikel „Luftdruck“.

Um statt des natürlichen den Briggschen Logarithmus zu erhalten, multiplizieren wir beide Seiten der Gleichung mit dem Modul desselben (0,43429). Dann bekommen wir rechts statt H eine andere Konstante $\frac{H}{\text{Modul}} = 18400$, die sogenannte Barometerkonstante, und die Formel lautet:

$$\log \left(\frac{p_0}{p} \right) = \frac{h}{18400\,(1+\alpha t)}$$

Dies ist die barometrische Höhenformel in ihrer einfachsten Gestalt. Sie ist ohne Berücksichtigung des Wasserdampfes, also

für „trockene Luft“ berechnet, und für eine Schwere, die sowohl konstant in bezug auf die geographische Breite, wie in bezug auf die Höhe ist. Berücksichtigt man die hieraus entspringenden Korrektionen, so kommt man zu den komplizierteren Formeln der barometrischen Höhenmessung. Wir begnügen uns hier damit, nur die eine zu geben, welche Rühlmann in seinem Werk: Die barometrische Höhenmessung und ihre Bedeutung für die Physik der Atmosphäre, Leipzig 1870 (wo auch die Geschichte der Formel eingehend behandelt ist) gegeben hat, und welche namentlich in der Jordanschen Fassung durch die auf ihr basierenden Höhentafeln dieses Autors Verbreitung gefunden hat. Sie lautet mit Jordans Bezeichnungen:

$$h = K \log \frac{B_1}{B_2} (1 + \alpha t)\left(1 + 0{,}377 \frac{e}{p}\right)$$
$$(1 + \beta \cos 2\varphi)\left(1 + \frac{2H}{r}\right)$$

wobei ist:

h der zu messende Höhenunterschied in Metern.

K = 18400 die Barometerkonstante.

B_1 und B_2 die an der unteren und an der oberen Station gleichzeitig gemessenen Luftdrucke, in beliebigem, aber einheitlichem Maße gemessen (meist in Millimeter Quecksilber).

$\alpha = 0{,}003665$ der Ausdehnungskoeffizient der Luft für 1° C.

t die mittlere Temperatur der Luft in ° C.

$\frac{e}{p}$ das Verhältnis des Dampfdruckes zum Luftdruck, als Mittelwert in der betrachteten Luftsäule.

$\beta = 0{,}00265$ der von der Abplattung der Erde abhängige Schwerekoeffizient.

φ die geographische Breite, Mittel für beide Stationen.

H die mittlere Höhe beider Stationen über dem Meere.

r der Erdhalbmesser, rund 6370000 m, oder für die Breite $\varphi = 50°$: log r = 6,80489.

Meist rechnet man aber nicht nach dieser genauen Formel, sondern benutzt Tabellen, in welchen für Dampfdruck und geographische Breite plausible Mittelwerte angenommen sind, und die Höhe lediglich als Funktion von Luftdruck und Temperatur (als Tabelle mit zwei Eingängen) tabuliert ist. Die Tabellen von Jordan (Barometrische Höhentafeln für Tiefland und für große Höhen, Hannover 1896) reichen bis 8000 m. Eine besonders für die hohen Registrierballonaufstiege geeignete Tabelle ist von Angot berechnet und von de Quervain neu herausgegeben worden (Beiträge z. Physik der freien Atmosphäre I S. 68).

Da die Wiedergabe einer umfangreicheren Tafel hier nicht möglich ist, so sei nur die nachstehende kleine Uebersichtstabelle nach Kremser mitgeteilt. Sie gibt direkt die Höhen als Funktion des Barometerstandes oben und der Mitteltemperatur der Luftsäule vom Meeresspiegel bis zum Beobachtungsort. Vorausgesetzt ist dabei, daß der

Barometrische Höhentafel (Höhen in Metern).

Luftdruck oben, mm Quecksilber	Mitteltemperatur der ganzen Luftsäule				
	+ 20°		0°		— 20°
750	114	0,4	106	0,4	98
	11,9		11,0		10,2
700	710	2,6	658	2,4	609
	12,8		11,9		11,0
650	1 349	4,8	1 252	4,7	1158
	13,8		12,8		11,9
600	2 040	7,4	1 892	7,0	1751
	15,0		13,9		12,9
550	2 791	10,1	2 589	9,7	2395
	16,5		15,3		14,1
500	3 614	13,1	3 352	12,6	3101
	18,2		16,9		15,6
450	4 523	16,4	4 195	15,7	3881
	20,3		18,9		17,4
400	5 539	20,0	5 138	19,2	4753
	23,1		21,4		19,8
350	6 692	24,3	6 207	23,2	5743
	26,6		24,7		22,8
300	8 022	29,0	7 441	27,8	6884
	31,5		29,2		27,0
250	9 596	34,8	8 900	33,3	8234
	38,5		35,7		33,0
200	11 521	41,7	10 687	41,0	9886

Luftdruck im Meeresspiegel gerade 760 mm beträgt. Die zwischen die Höhenzahlen gedruckten Ziffern dienen zum Interpolieren und geben (in der Vertikalreihe) die Höhenänderung pro Millimeter Luftdruckänderung, und (in der Horizontalreihe) diejenige Höhenänderung, welche einer Aenderung der Mitteltemperatur um 1° C entspricht. Ist der Luftdruck im Meeresspiegel um 1% größer oder kleiner als 760 mm, so sind die Zahlen der ersten Vertikalspalte entsprechend um 1% zu ändern.

Literatur. *Ueber das Wild-Fueßsche Barometer. Wiss. Abh. d. Phys. Techn. Reichsanstalt I, 93, 1894.* — ***H. Wild,*** *Methode zur Füllung von Barometer-Röhren ohne Auskochen und ohne Gefahr des Zerspringens derselben. Wilds Repertorium für Meteorologie. Petersburg 1872, II, S. 115.* — ***Jelineks*** *Anleitung zur Ausführung meteorologischer Beobachtungen nebst einer Sammlung von Hilfstafeln.* — ***Sprung,*** *Lehrbuch der Meteorologie. Hamburg 1885.* — ***Hann,*** *Lehrbuch der Meteorologie. 2. Aufl., Leipzig 1906.* — *Anleitung zur Anstellung und Berechnung meteorologischer Beobachtungen. Herausgeg. vom kgl. Preuß. Met. Inst. 2. Aufl., 1. Teil, Berlin 1904, 2. Teil, 1905.* — ***W. Jordan,*** *Handbuch der Vermessungskunde, 3. Aufl. Stuttgart 1888/90.* — ***Derselbe,*** *Barometrische Höhentafeln für Tiefland und für große Höhen. Hannover 1896.* — ***Rühlmann,*** *Die barometrische Höhenmessung und ihre Bedeutung für die Physik der Atmosphäre. Leipzig 1870.* — ***de Quervain,*** *Tafeln zur barometrischen Höhenberechnung nach A. Angot. Beitr. z. Physik d. freien Atmosphäre I, 2, S. 68.*

A. Wegener.

Bartholin
Erasmus.

Geboren am 13. August 1625 zu Roeskilde in Dänemark; gestorben am 4. November 1698 zu Kopenhagen. Er ist der sechste Sohn des berühmten Lehrers der Medizin, Theologie und Philosophie an der Universität Kopenhagen, Caspar Bartholin (eigentlich Barthelsen). Seit 1644 widmete er sich dem Studium der Medizin. Nach der Rückkehr von einer zehnjährigen Reise (1646 bis 1656) nach England, Holland, Frankreich und Italien wurde er 1657 Professor der Mathematik und Extraordinarius der Medizin in Kopenhagen, wo inzwischen sein Bruder Thomas (gestorben 1616) als Professor der Medizin berühmt geworden war. 1671 wurde er zum Ordinarius der Medizin, 1675 zum Assessor des höchsten Gerichts und zum Justizrat, 1694 zum Staatsrat ernannt.

Ihm verdanken wir die wichtige Entdeckung der Doppelbrechung am isländischen Kalkspat. Außer zahlreichen kleineren, hauptsächlich mathematischen Schriften sind zu nennen: 1665 De cometis annorum; 1664 et 1665 Opusculum ex observationibus Hafniae habitis adornatum; 1669 Experimenta crystalli islandici disdiaclastici, quibus mira et insolita refractio detegitur; 1674 De naturae mirabilibus quaestiones academicae.

Literatur. ***J. P. Nicéron,*** *Mémoires pour servir à l'histoire des hommes illustres dans la république des lettres (1727 bis 1738), Bd. 32.* — ***R. Nyerup og J. E. Kraft,*** *Almindelige Literatur Lexicon for Danmark, Norge og Island, Kjöbenhagen 1820.*

K. Spangenberg.

Bärtierchen.

Tardigraden, wegen ihrer plumpen, durch die acht stummelförmigen Füße hervorgebrachten Bewegungen so bezeichnet; ihre Stellung im System erscheint nicht sicher, so daß man sie sowohl zu den Gliedertieren (besonders zu den Arachnoiden), wie in die Nähe der Ringelwürmer gestellt hat; hier sollen sie unter Tardigraden behandelt werden (vgl. den Artikel „Tardigrada“).

Bartling
Friedrich Gottlieb.

Botaniker. Geboren am 9. Dezember 1798 in Hannover, studierte von 1816 bis 1820 in Göttingen und auch auf Reisen in dieser Zeit in Ungarn und Kroatien Naturwissenschaften, besonders Botanik, habilitierte sich in Göttingen 1822 als Privatdozent, wurde ebendort 1826 außerordentlicher und 1837 ordentlicher Professor der Botanik, wo er auch am 19. November 1875 starb. Seine wissenschaftliche Tätigkeit erstreckte sich hauptsächlich auf floristische und systematische Themen. Unter jenen sind seine Flora der österreichischen Küstenländer (1825), unter diesen vor allem seine Ordines naturales plantarum (1830) zu nennen, die einen nicht unwesentlichen Fortschritt auf dem Wege zu einem natürlichen System brachten. Ferner bearbeitete er eine Anzahl Familien in verschiedenen Sammlungen (Plantae Ecklonianae, Preissianae), arbeitete an Martius' Flora brasiliensis mit und war mit besonderem Erfolge für die Ausgestaltung des botanischen Gartens und der Sammlungen in Göttingen tätig.

W. Ruhland.

Bary
Anton de.

Botaniker. Geboren am 26. Januar 1831 in Frankfurt a. M. als Sohn eines Arztes, beschäftigte sich schon als Schüler mit der Botanik, studierte 1849 in Heidelberg und von 1850 bis 1853 u. a. unter Alexander Braun in Berlin Medizin und Botanik. Nachdem er 1853 seine medizinischen Examina bestanden hatte, habilitierte er sich im Dezember desselben Jahres

in Tübingen für Botanik und wurde 1855 außerordentlicher und 1859 ordentlicher Professor der Botanik in Freiburg. 1866 siedelte er in gleicher Eigenschaft nach Halle und 1872 nach Straßburg über, wo er am 22. Januar 1888 starb. Unter den bahnbrechenden Arbeiten de Barys sind an erster Stelle die zahlreichen über Pilze zu erwähnen, so die über Brandpilze und die durch sie verursachten Krankheiten (1853), die Mycetozoen (1859), die Geschlechtsorgane von Peronospora (1861), die Beiträge zur Morphologie und Physiologie der Pilze (Frankfurt a. M. 1864, 1866 und 1870), über Caeoma pinitorquum (1863), Ustilagineen (1865 und 1866), insektentötende Pilze (1867 und 1869) und viele andere, durch die das wissenschaftliche Studium der Entwickelung, des Baues und der Physiologie der Pilze begründet wurde. Zusammengefaßt sind diese Arbeiten und die anderer in seinem Buch Vergleichende Morphologie und Biologie der Pilze, Mycetozoen und Bakterien (Leipzig 1884; erste Ausgabe 1860). Zu erwähnen sind ferner seine Untersuchungen über die Familie der Conjugaten (1858), über die Wachsüberzüge der Epidermis (1871), über Apogamie bei Farnen (1878) und vor allem seine meisterhafte Vergleichende Anatomie der Vegetationsorgane der Phanerogamen und Farne (Leipzig 1877).

Literatur. ***Wilhelm*** *in Bot. Zentralbl. 1888, S. 93 und* ***Rees*** *in Ber. d. Deutsch. Bot. Gesellsch. Bd. VI, S. VIII.*

W. Ruhland.

Basen.

Anorganische Basen.

1. Begriff. 2. Nachweis. 3. Bildungsweise. 4. Bezeichnung. 5. Einteilung nach der Zahl der OH-Gruppen. 6. Dissoziation. 7. Stärke der Basen. 8. Starke Basen. 9. Mittelstarke Basen. 10. Schwache Basen. 11. Komplexe Aminbasen.

1. Begriff. Der Begriff der Basen wurde zum ersten Male i. J. 1666 von Otto Tachenius klar ausgesprochen. Dieser bezeichnete als Basen die Stoffe, die mit Säuren Salze zu bilden imstande sind. Diese Definition hat noch heute volle Gültigkeit. Bisweilen wird der Begriff „Base" auch etwas enger gefaßt und als solche nur ein Stoff bezeichnet, der Hydroxylgruppen (OH) enthält und diese in wässeriger Lösung als Hydroxylionen (OH') abdissoziiert (näheres s. unter 6). Der Begriff „Base" im weiteren Sinne umfaßt außer den Basen im engeren Sinne noch die durch Wasserabspaltung aus ihnen entstandenen Stoffe (Oxyde, Ammoniak).

2. Nachweis. Alle Basen geben in wässeriger Lösung einige gemeinsame Farbreaktionen, die die Anwesenheit von Basen, oder, was dasselbe bedeutet, die alkalische Reaktion leicht nachzuweisen gestatten. Auf Zusatz von Basen färbt sich eine Lösung

von rotem	Lakmus	blau
„ farblosem	Phenolphtalein	rot
„ „	p-Nitrophenol	gelb
„ rotem	Methylrot	„
„ orangem	Methylorange	„
„ blauem	Methylviolett	violett
„ „	Kongorot	rot
„ gelbem	Curcuma	braun.

Zeigen die zu den Reaktionen benutzten Lösungen oder die mit diesen Lösungen getränkten Fließpapiere schon vor der Reaktion die für Basen charakteristische Färbung, so kann man durch Zusatz von einigen Tropfen einer verdünnten Säurelösung den Farbenumschlag erhalten.

Alkalische Reaktion kann auch bei der Auflösung von Salzen in Wasser entstehen. Auch hierbei bilden sich bisweilen Basen. Man nennt diesen Vorgang Hydrolyse (vgl. hierzu den Artikel „Dissoziation [elektrolytische]").

3. Bildungsweise. Die meisten Basen sind die Hydrate der Oxyde. Sie bilden sich also ganz allgemein durch Anlagerung von Wasser an die Oxyde. So entsteht Kaliumhydroxyd aus Kaliumoxyd und Wasser: $K_2O + H_2O = 2\,KOH$; Bariumhydroxyd aus Bariumoxyd und Wasser: $BaO + H_2O = Ba(OH)_2$. Die Oxyde nehmen im allgemeinen um so leichter Wasser auf und geben es um so schwerer ab, je unedler ihre Metalle sind. Die Hydroxyde der Alkalien geben ihr Wasser erst bei Temperaturen über 700° ab, und zwar bei um so höherer Temperatur, je höher das Atomgewicht des Alkalis ist. Bei Kalilauge und den Hydroxyden der Alkalien mit noch höherem Atomgewicht ist es bisher auch bei Weißglut noch nicht gelungen, ihr Wasser abzuspalten. Die Hydroxyde der Erdalkalien verlieren ihren Wassergehalt bei Temperaturen über 400° und zwar, wie die Alkalien, um so schwerer, je höher das Atomgewicht des basenbildenden Metalls ist. Die Hydroxyde der unedlen Metalle verlieren ihr Wasser schon bei Erhitzen über 100°. Die Hydroxyde von Metallen, die wie z. B. das Kupfer, den Edelmetallen nahe stehen, verlieren das Wasser schon unter 100°. Die Edelmetalle endlich bilden auch bei Zimmertemperatur keine Hydroxyde mehr, sondern nur noch Oxyde. Es zeigt sich also ein Zusammenhang zwischen der Basenbildungsfähigkeit und der „edlen Natur" der Metalle.

4. Bezeichnung. Man bezeichnet die Basen nach der neueren Nomenklatur in der Weise, daß man den Namen des Metalls, das die Base bildet, voraussteilt. Kommt dieses in mehreren Oxydationsstufen vor, so wählt man die lateinische Bezeichnung und fügt bei der niedrigeren Oxydationsstufe ein o, bei der höheren ein i an, z. B. Ferro-, Ferri-. Hinter den Namen des Metalls stellt man die Endung hydroxyd. Also z. B.

Natriumhydroxyd, Calciumhydroxyd, Ferrohydroxyd, Ferrihydroxyd. In der Pharmazie und im Chemikalienhandel ist die lateinische Nomenklatur noch häufig. Bei dieser werden hinter die lateinische Benennung des Metalls die Worte oxydatum hydricum oder oxydulatum hydricum gefügt, z. B. Ferrum oxydatum hydricum. Die Hydroxyde der Alkalien bezeichnet man auch kurz mit hydricum oder causticum, z. B. Kalium hydricum, Kalium causticum. In der älteren, auch heute noch häufig gebrauchten Bezeichnungsweise setzt man die Silbe Aetz- vor den Namen des Oxyds, z. B. Aetznatron, Aetzkali, Aetzbaryt; zur Bezeichnung der wässerigen Lösungen wird hinter den Namen des Oxyds die Endung -lauge oder -wasser angefügt, z. B. Natronlauge, Kalilauge, Barytwasser, Kalkwasser. Bisweilen wird auch der Kürze halber der Name des Oxyds genannt, wenn man das Hydroxyd oder seine wässerige Lösung bezeichnen will, z. B. Natron, Kali, Baryt.

5. Einteilung nach der Zahl der OH-Gruppen. Je nach der Zahl der OH-Gruppen, die durch Säurereste ersetzt werden können, nennt man eine Base 1-säurig, 2-säurig, oder mehrsäurig. Man bezeichnet mithin als 1-säurige Basen z. B. Natronlauge (NaOH), Kalilauge (KOH). Als 2-säurige Basen bezeichnet man z.B. Calciumhydroxyd ($Ca(OH)_2$) und Bariumhydroxyd ($Ba(OH)_2$); als 3-säurige Base z. B. Alluminiumhydroxyd ($Al(OH)_3$); als 4-säurige z. B. Stannihydroxyd ($Sn(OH)_4$). Mehr als 4-säurige Basen sind sehr selten.

6. Dissoziation. Die Basen sind bei ihrer Auflösung in Wasser elektrolytisch dissoziiert in der Weise, daß die mit negativer Elektrizität geladene OH-Gruppe als Hydroxylion (OH′) abdissoziiert wird. Die 1-säurigen Basen sind also im Sinne des folgenden Gleichgewichts zerfallen:

$$NaOH \rightleftarrows Na^{\cdot} + OH'$$
$$KOH \rightleftarrows K^{\cdot} + OH' \text{ usw.}$$

Die wässerige Lösung enthält nebeneinander 3 Molekülgattungen, die undissoziierten Moleküle, die OH′-Ionen und die Metall-Kationen.

Die 2-säurigen Basen zeigen zunächst eine primäre Dissoziation, in dem ein OH-Ion abgespalten wird; z. B.

$$Ba\begin{cases}OH\\OH\end{cases} \rightleftarrows Ba\begin{cases}OH\\ \cdot\end{cases} + OH'$$

Das Kation $BaOH^{\cdot}$ ist dann sekundär weiter dissoziiert im Sinne der Gleichung:

$$Ba\begin{cases}OH\\ \cdot\end{cases} \rightleftarrows Ba^{\cdot\cdot} + OH'$$

Die wässerigen Lösungen von Bariumhydroxyd enthalten also nebeneinander die 4 Molekülgattungen $Ba(OH)_2$; $BaOH^{\cdot}$; $Ba^{\cdot\cdot}$ und OH′. Und zwar ist die sekundäre Dissoziation stets viel geringer als die primäre.

Ganz entsprechend können 3-säurige Basen eine primäre, sekundäre und tertiäre Dissoziation zeigen.

Es ist also ein allgemeines Charakteristikum aller Basen, daß sie in wässeriger Lösung elektrolytisch dissoziiert sind und als Anionen OH′-Ionen abspalten. Die Reaktionen, die wir oben als alkalische Reaktionen bezeichnet haben, sind also als Reaktionen auf die allen Basen gemeine Molekülgattung, als Reaktionen auf OH′-Ionen, aufzufassen.

7. Stärke der Basen. Nachdem wir als charakteristische Eigenschaft aller Basen ihre Fähigkeit OH′-Ionen abzudissoziieren erkannt haben, ergibt sich von selbst, daß die Stärke der Basen davon abhängt, wieviel OH′-Ionen sie bei gegebener Konzentrationen bilden können. Je stärker eine Base dissoziiert ist, um so mehr OH′-Ionen wird die Lösung enthalten und um so stärker wird die Base sein. Alle Methoden die Stärke einer Base zu bestimmen, beruhen also darauf, die OH′-Konzentration ihrer wässerigen Lösung oder eine damit zusammenhängende Eigenschaft zu messen.

Hieraus ergeben sich folgende M e ß - m e t h o d e n:

1. L e i t f ä h i g k e i t. Die elektrische Leitfähigkeit einer Lösung beruht auf ihrer elektrolytischen Dissoziation. Da sich der Dissoziationsgrad mit der Konzentration ändert (vgl. den Artikel „D i s s o z i a t i o n [e l e k t r o l y t i s c h e]“), so gibt die Leitfähigkeit zweier Basen bei verschiedenen Konzentrationen kein Maß ihrer Stärke. Vergleicht man jedoch die Leitfähigkeit gleichkonzentrierter Lösungen verschiedener Basen miteinander, so wird im allgemeinen die stärker dissoziierte Base auch die größere Leitfähigkeit zeigen. Aber auch bei gleichen Konzentrationen zeigt das Verhältnis der Leitfähigkeit zweier Basen nicht ganz genau das Verhältnis ihrer Stärke an, da ihre Kationen verschiedene Wanderungsgeschwindigkeit besitzen. Ein exaktes Maß der Stärke einer Base gibt die aus der Leitfähigkeit leicht zu bestimmende Dissoziationskonstante, die bei schwachen Basen von der Konzentration der Lösung unabhängig ist (vgl. den Artikel „D i s s o z i a t i o n [e l e k t r o l y t i s c h e]“).

2. E l e k t r o m o t o r i s c h e K r a f t. Bringt man in die wässerige Lösung einer Base ein Platinblech, das man mit Sauerstoff sättigt, verbindet diese Lösung durch einen Flüssigkeitsheber mit einer Säurelösung bekannter Konzentration, in die ein mit Wasserstoff gesättigtes Platinblech eintaucht und mißt die zwischen den beiden Platinblechen herrschende elektromotorische Kraft E, so hängt diese nach der N e r n s t schen Formel

$$E = \text{konst. ln} \frac{(H^{\cdot})}{(OH')}$$

von der Wasserstoffionen-Konzentration ($H^{\cdot}$) der Säure und der Hydroxylionen-Konzentration (OH') der Base ab. Sind alle anderen Größen bekannt, so kann man nach obiger Formel die OH'-Ionen-Konzentration der Base berechnen (vgl. den Artikel „Potential [elektrolytisches]").

3. Reaktionsgeschwindigkeit. Eine Anzahl chemischer Reaktionen wie die Esterverseifung, die Acetonkondensation und der Rückgang der Birotation von Zucker werden durch OH'-Ionen katalytisch beschleunigt. Und zwar ist die Beschleunigung der OH'-Konzentration proportional. Die Messung der Reaktionsbeschleunigung gibt also ein Maß der OH'-Konzentration der Lösung.

4. Verteilung einer Säure zwischen zwei Basen. Gibt man zu einer Lösung, die zwei Basen enthält, von denen die Stärke der einen bekannt ist, eine Säure in einer Menge hinzu, die nicht ausreicht um beide Basen vollständig zu neutralisieren, so verteilt sich die Säure zwischen beide Basen in der Weise, daß die Mengen der Säure, die von jeder der Basen neutralisiert werden, im gleichen Verhältnis zueinander stehen, wie die Stärke der Basen (vgl. den Artikel „Chemische Verwandtschaft").

5. Hydrolyse. Auch das Wasser spaltet OH'-Ionen ab, kann also als eine, freilich außerordentlich schwache, Base aufgefaßt werden, man kann daher auch die Verteilung einer Säure zwischen einer Base von unbekannter Stärke und Wasser zur Messung der Stärke dieser Base benutzen. Eine derartige Verteilung findet bei der Auflösung eines Salzes der Base in Wasser statt. Löst man z. B. Eisenchlorid ($FeCl_3$) in Wasser auf, so haben wir denselben Fall, wie wenn wir Salzsäure zwischen Wasser und Eisenhydroxyd verteilen; es herrscht also in wässriger Lösung das Gleichgewicht

$$FeCl_3 + n\,H_2O \rightleftarrows \begin{matrix} Fe(OH)_3 \\ (n\text{-}3)\,HOH \end{matrix} + 3\,HCl$$

Aus dem Verhältnis der Konzentration von Eisenchlorid, Eisenhydroxyd und Salzsäure kann man die Stärke von Eisenhydroxyd als Base berechnen. Eine derartige Spaltung des Salzes unter der Einwirkung von Wasser in freie Säure und freie Base bezeichnet man als hydrolytische Dissoziation. Der Grad der hydrolytischen Dissoziation gibt also ebenfalls ein Maß für die Stärke einer Base.

Als starke Basen bezeichnet man solche, die in 1 normaler Lösung mehr als 50 % dissoziiert sind; als mittelstarke solche, die mehr als 1 % dissoziiert sind und als schwache solche, die weniger als 1 % dissoziiert sind.

Ueber den Dissoziationsgrad der gebräuchlichsten Basen gibt die folgende Tabelle Aufschluß. Bei Zimmertemperatur (18 °) ist

KOH	in 1	norm.	Lös.	zu 77	%	dissoz.
NaOH	„ 1	„	„	„ 73	„	„
LiOH	„ 1	„	„	„ 63	„	„
$Ba(OH)_2$ [1]	„ $^{1}/_{64}$	„	„	„ 93	„	„
$Sr(OH)_2$ [1]	„ $^{1}/_{64}$	„	„	„ 92	„	„
$Ca(OH)_2$ [1]	„ $^{1}/_{64}$	„	„	„ 90	„	„
AgOH [1]	„ $^{1}/_{1783}$	„	„	„ 38,8	„	„
NH_4OH	„ 1	„	„	„ 0,4	„	„

8. Starke Basen. 1. Alkalien. Die stärksten und im Wasser am leichtesten löslichen Basen sind die der Alkalien. Und zwar nimmt bei diesen wieder Stärke und Löslichkeit mit steigendem Atomgewicht zu. Wenn wir von den seltener vorkommenden Alkalien absehen, ist also das Kaliumhydroxyd die stärkste und in Wasser am leichtesten löslichste Base, die wir besitzen, dann kommt Natrium-, zum Schluß Lithiumhydroxyd.

2. Erdalkalien. Die Hydroxyde der Erdalkalien gehören ebenfalls noch zu den starken Basen, obwohl sie schwächer als die der Alkalien sind. Auch bei ihnen nimmt Stärke und Löslichkeit mit fallendem Atomgewicht ab, so daß die Reihenfolge Barium-, Strontium-, Calciumhydroxyd ist. Dieses ist schon recht schwerlöslich in Wasser. Die gesättigte Lösung enthält bei Zimmertemperatur nur 0,17 % $Ca(OH)_2$.

9. Mittelstarke Basen. Als mittelstarke Basen kommt hauptsächlich die wässrige Aufschlemmung von Silberoxyd (Ag_2O) in Betracht. Dieses bildet mit Wasser ein Hydroxyd

$$Ag_2O + H_2O = 2\,AgOH = 2\,Ag^{\cdot} + 2\,OH',$$

das im freien Zustande freilich nicht bekannt ist.

Die gesättigte Lösung enthält bei Zimmertemperatur nur 0,002 % AgOH, reagiert aber trotzdem schwach alkalisch.

10. Schwache Basen. Als schwache Base wird meist Ammoniumhydroxyd verwandt. Gasförmiges Ammoniak löst sich leicht in Wasser. 100 g der gesättigten Lösung enthalten bei Zimmertemperatur 25 g NH_3. Die wässrige Lösung enthält Ammoniumhydroxyd, reagiert also alkalisch:

$$NH_3 + H_2O = NH_4OH = NH_4^{\cdot} + OH'.$$

Da sich die NH_4-Gruppe den Alkalien sehr ähnlich verhält, so wird Ammoniumhydroxyd bisweilen auch als ein Alkalihydroxyd bezeichnet. Während alle anderen Alkalien nicht flüchtig sind, ist Ammoniak flüchtig. NH_3 entweicht beim Eindampfen der wässrigen Lösung gasförmig. Im Gegensatz zu den

[1]) Diese Angaben beziehen sich auf 25 °.

anderen Alkalien, die man als fixe Alkalien bezeichnet, nennt man daher Ammoniumhydroxyd ein flüchtiges Alkali.

Die Hydroxyde der alkalischen Erden und der Schwermetalle sind in Wasser meist nur sehr wenig löslich und ihre Lösungen sind außerordentlich schwache Basen. Sie finden daher als solche nur selten Verwendung.

Im allgemeinen nimmt also, je edler ein Metall ist, seine Fähigkeit, Basen zu bilden immer mehr ab. Silber bildet davon eine Ausnahme. Die Löslichkeit wie die Stärke der Base sinkt, je mehr die „edle Natur“ des Metalles hervortritt oder, wie man auch sagen kann, je geringer die „Elektroaffinität“ des Metalles wird (vgl. den Artikel „Salze“).

Die Löslichkeit vieler Hydroxyde ist so gering, daß sie bisher überhaupt noch nicht sicher nachgewiesen werden konnte. Gerade diese Hydroxyde zeigen die Fähigkeit kolloidale Lösungen zu bilden. Die durch Koagulation dieser Sole erhaltenen Gele haben zunächst einen großen Wassergehalt, so daß sie als Verbindungen oder Gemische von Hydroxyden mit Wasser angesehen werden können. Beim langsamen Entwässern im Vakuum geben diese Gele alles Wasser ab, so daß schließlich die reinen Oxyde zurückbleiben. Hierbei zeigen sich keine der Zusammensetzung der reinen Hydroxyde entsprechenden Haltepunkte in der Wasserabgabe. Es ist daher zweifelhaft, ob diese kolloidalen Lösungen aus Lösungen der Hydroxyde oder der Oxyde in Wasser bestehen.

11. Komplexe Aminbasen. Ammoniak hat die Fähigkeit sich an Metallhydroxyde anzulagern. Dadurch entstehen Basen, die gleichzeitig verhältnismäßig stark und in Wasser leicht löslich sind. So bildet z. B. Zinkhydroxyd ($Zn(OH)_2$) mit Ammoniak Tetraminzinkhydroxyd

$$Zn(OH)_2 + 4\,NH_3 = [Zn(NH_3)_4](OH)_2.$$

In ähnlicher Weise bildet sich ein

Hexaminkobaltihydroxyd $[Co(NH_3)_6](OH)_3$
Hexaminnickelohydroxyd $[Ni(NH_3)_6](OH)_2$
Tetramincuprihydroxyd $[Cu(NH_3)_4](OH)_2$
Tetramincadmiumhydroxyd $[Cd(NH_3)_4](OH)_2$
Diaminsilberhydroxyd $[Ag(NH_3)_2]OH$.

Sie sind in wässriger Lösung in komplexe Metallamin-Ionen und OH'-Ionen dissoziiert, z. B.

$$[Zn(NH_3)_6](OH)_2 = [Zn(NH_3)_6]^{\cdot\cdot} + 2\,OH'.$$

Die Metallaminionen bezeichnet man als komplexe Ionen, da sie aus einem Komplex von Metall und Amomniak bestehen (vgl. den Artikel „Salze“). Sie sind, wenn auch in geringerem Maße, weiter dissoziiert, z. B.

$$[Zn(NH_3)_6]^{\cdot\cdot} = Zn^{\cdot\cdot} + 6\,NH_3.$$

Das Metallion bezeichnet man im Gegensatz zum Komplexion als Stamm- oder typisches Ion. Die Lösungen der komplexen Basen enthalten also sehr viele komplexe und sehr wenige typische Ionen. Die obengenannten Aminbasen sind die ammoniakreichsten Basen, die die betreffenden typischen Ionen zu bilden vermögen. Sie werden daher nach der Werner'schen Theorie als koordinativ gesättigt bezeichnet. Die Anzahl der Ammoniakgruppen, die ein komplexes Ion maximal enthalten kann, beträgt meist 4 oder 6. Diese Zahl wird die Koordinationszahl des Metallions genannt (vgl. die Artikel „Salze“ und „Valenzlehre“).

Von den meisten Metallionen sind auch Aminbasen mit geringerem Ammoniakgehalt bekannt. Es besteht nun die Regelmäßigkeit, daß die Basen um so stärker werden, je mehr Moleküle Ammoniak an ein Metallion angelagert sind, je stärker koordinativ gesättigt also das Metallion ist.

Literatur. ***Gmelin, Kraut, Friedheim, Peters,*** *Handbuch der anorganischen Chemie. Heidelberg.* — ***Abegg und Auerbach,*** *Handbuch der anorganischen Chemie. Leipzig.* — ***Sv. Arrhenius,*** *Theorien der Chemie. Leipzig.* — ***A. Werner,*** *Neuere Anschauungen auf dem Gebiete der anorganischen Chemie. Braunschweig.* — ***H. Lundén,*** *Affinitätsmessungen an schwachen Säuren und Basen. Stuttgart.* — ***W. Ostwald,*** *Grundlinien der anorganischen. Chemie. Leipzig.* — ***A. F. Holleman,*** *Lehrbuch der anorganischen Chemie. Leipzig.* — ***Remsen und Seubert,*** *Anorganische Chemie. Tübingen.* — ***E. H. Riesenfeld,*** *Anorganisch chemisches Praktikum. Leipzig.*

E. H. Riesenfeld

Organische Basen.

1. Allgemeines 2. Stickstoffbasen: a) Abkömmlinge des Ammoniaks und Ammoniumhydroxyds: α) Amine und Ammoniumbasen. β) Säureamide. γ) Amidine. b) Abkömmlinge des Hydroxylamins. c) Abkömmlinge des Hydrazins. d) Diazoniumverbindungen. e) zyklische Stickstoffbasen. 3. Phosphor-, Arsen- und Antimonbasen: a) Basische Verbindungen des Phosphors. b) Basische Verbindungen des Arsens. c) Basische Verbindungen des Antimons. 4. Schwefel-, (Selen-, Tellur-)Basen. 5. Basische Verbindungen des Jods. 6. Oxoniumsalze. 7. Basische Eigenschaften des Kohlenstoffs. 8. Pseudobasen.

1. Allgemeines. Ebenso wie man in der anorganischen Chemie Stoffe wie Ammoniak NH_3, Calciumoxyd CaO und ähnliche häufig Basen nennt, obgleich dieser Name eigentlich nur den hydroxylhaltigen Verbindungen Ammoniumhydroxyd NH_4OH, Calciumhydroxyd $Ca(OH)_2$ usw. zukommt, so ist es auch in der organischen Chemie ganz allge-

mein üblich, alle Stoffe, die sich mit Säuren zu Salzen vereinigen, Basen zu nennen. Man unterscheidet daher praktisch zwei Klassen von organischen Basen. Die Basen der ersten Klasse bilden ihre Salze durch Anlagerung des ganzen Säuremoleküls z. B.

$NH_2(CH_3) + HCl = NH_3(CH_3)Cl$
Methylamin Methylaminchlorid

$2C_6H_5NH_2 + H_2SO_4 = (C_6H_5NH_3)_2SO_4$
Anilin Anilinsulfat

Hierher gehören Amine, Hydroxylamine, Hydrazine, Phosphine, Arsine, Stibine.

Bei den Basen der zweiten Klasse findet die Salzbildung unter Austritt von Wasser statt

$N(CH_3)_4OH + HCl = N(CH_3)_4Cl + H_2O$
Tetramethylammoniumhydroxyd Tetramethylammoniumchlorid

$(C_7H_7)_2SO + 2HBr = (C_7H_7)_2SBr_2 + H_2O$
Dibenzylsulfoxyd Dibenzylsulfobromid

In diese zweite Gruppe gehören die Ammonium-, Phosphonium-, Arsonium-, Stibonium-, Jodonium-(Jodinium-)Basen, sowie Sulfoxyde und Jodosoverbindungen.

Durch den Eintritt von Alkoholradikalen der Fettreihe wird der basische Charakter einer Verbindung verstärkt, während aromatische Reste ihn im allgemeinen abschwächen. Die Basizität nimmt mit steigender Anzahl der Kohlenstoffatome des organischen Restes ab. Ebenso nimmt bei den Basen, die sich von den Elementen der Stickstoffgruppe ableiten, die Basizität entsprechender Verbindungen mit wachsendem Atomgewicht des Stammelementes ab.

Durch Vereinigung mit vier Alkylresten erhalten die fünfwertigen Elemente Stickstoff, Phosphor, Arsen und Antimon den Charakter eines stark positiven einwertigen Metalls (Alkalimetalls). Die Hydroxyde sind starke einsäurige Basen. Das gleiche ist der Fall, wenn an ein vierwertiges Schwefelatom drei oder an ein dreiwertiges Jodatom zwei Alkylreste gebunden sind.

Sind die genannten Elemente mit je einen Alkylrest weniger vereinigt, so daß also noch zwei Wertigkeiten übrig bleiben, so entstehen bei der Absättigung dieser Wertigkeiten mit Sauerstoff Oxyde, die sich wie die Oxyde positiver zweiwertiger Metalle (Erdalkalimetalle) verhalten, also zweisäurige Basen sind. Die zugehörigen Hydroxyde sind nicht bekannt.

2. Stickstoffbasen. Bei weitem die zahlreichsten und wichtigsten der organischen Basen sind die Stickstoffbasen. Sie lassen sich teils auf das Ammoniak und Ammoniumhydroxyd, teils auf Hydroxylamin und Hydrazin zurückzuführen (vgl. den Artikel „Ammoniakderivate").

2a) Abkömmlinge des Ammoniaks und Ammoniumhydroxyds. *a*) Amine und Ammoniumbasen. Ersetzt man im Ammoniak die Wasserstoffatome durch Kohlenwasserstoffreste, so entstehen Amine, die man als primäre, sekundäre oder tertiäre unterscheidet, je nachdem ein, zwei oder alle drei Wasserstoffatome des Ammoniaks ersetzt sind.

$N{\lesssim}(CH_3)(H)(H)$ Methylamin — $N(C_6H_5)(H)(H)$ Phenylamin = Anilin

primär

$N(CH_3)(CH_3)(H)$ Dimethylamin — $N(CH_3)(C_2H_5)(H)$ Methyläthylamin — $N(C_6H_5)(CH_3)(H)$ Methylanilin

sekundär

$N(CH_3)(CH_3)(CH_3)$ Trimethylamin — $N(CH_3)(C_2H_5)(C_3H_7)$ Methyläthylpropylamin — $N(C_6H_5)(CH_3)(CH_3)$ Dimethylanilin

tertiär

Die sekundären Amine heißen auch Imin-, die tertiären Nitrilbasen; diese Benennung ist besonders bei mehrwertigen organischen Resten üblich.

Im Ammoniumhydroxyd können an Stelle aller vier Wasserstoffatome der Ammoniumgruppe Alkylreste treten; die entstehenden Verbindungen heißen quaternäre Ammoniumbasen z. B. $N(CH_3)_4OH$ Tetramethylammoniumhydroxyd. Die eintretenden organischen Reste können gleich oder verschieden sein.

Man kann die Amine auch umgekehrt von den Kohlenwasserstoffen ausgehend durch Ersatz der Wasserstoffatome durch die Amino-(NH_2)Gruppe ableiten. Je nach der Zahl der eintretenden Aminogruppen unterscheidet man Monamine, Diamine usw.

$CH_2NH_2-CH_3$ Aethylamin — $CH_2NH_2-CH_2NH_2$ Aethylendiamin

Die Amine der Fettreihe gleichen in vielen Beziehungen z. B. im Geruch und in der Löslichkeit in Wasser noch dem Ammoniak, von dem sie sich jedoch durch ihre Brennbarkeit unterscheiden. Mit wachsender Zahl der Kohlenstoffatome nimmt diese Aehnlichkeit immer mehr ab. Ebenso wie Ammoniak bilden auch die Amine leicht komplexe Verbindungen.

Die Amine lagern bei der Salzbildung die

Säure einfach an, indem das vorher dreiwertige Stickstoffatom fünfwertig wird. Die Ammoniumbasen bilden ihre Salze unter Wasseraustritt; in ihnen ist der Stickstoff von vornherein fünfwertig.

Der basische Charakter wird durch den Eintritt von Alkoholradikalen der Fettreihe gegenüber dem Ammoniak verstärkt, während er durch den Eintritt aromatischer Reste abgeschwächt wird. Die quaternären Ammoniumbasen der Fettreihe sind stärkere Basen als Kaliumhydroxyd und können deshalb aus ihren Salzen hierdurch nicht freigemacht werden; man gewinnt sie durch Zerlegung der halogenwasserstoffsauren Salze mit Silberoxyd.

$$N(CH_3)_4J + AgOH = N(CH_3)_4OH + AgJ$$

Die Aminogruppe kann sich nicht nur mit Alkoholradikalen, sondern auch mit anderen organischen Resten verbinden. Die durch ihren Eintritt an Stelle von Wasserstoff in Alkohole, Säuren usw. entstehenden Aminoalkohole, Aminosäuren usw. verhalten sich einerseits genau wie die einfachen Amine, andererseits zeigen sie natürlich auch alle Reaktionen, die durch den zweiten Substituenten bedingt sind.

Weiteres über Darstellung und Verhalten der Amine siehe im Artikel „Ammoniakderivate".

β) Säureamide. Ebenso wie durch Alkoholradikale können die Wasserstoffatome des Ammoniaks auch durch Säurereste ersetzt werden. Die entstehenden Verbindungen heißen Säureamide

$N\begin{cases}COCH_3\\H\\H\end{cases}$	$N\begin{cases}COCH_3\\COCH_3\\H\end{cases}$	$N\begin{cases}COCH_3\\COCH_3\\COCH_3\end{cases}$
Acetamid	Diacetamid	Triacetamid

Umgekehrt kann man die Säureamide auch von den Säuren ausgehend durch Ersatz der Hydroxylgruppe durch die Aminogruppe ableiten

CH_3-CONH_2	$\begin{matrix}CH_2-CONH_2\\ \vert \\ CH_2-COOH\end{matrix}$	$\begin{matrix}CH_2-CONH_2\\ \vert \\ CH_2-CONH_2\end{matrix}$
Acetamid	Bernsteinsäuremonamid	Bernsteinsäurediamid.

Auch der Wasserstoff der primären und sekundären Amine kann durch Säurereste ersetzt werden unter Bildung substituierter Säureamide

$$N\begin{cases}CH_3\\COCH_3\\H\end{cases} = CH_3-CONHCH_3$$

Methylacetamid

$$N\begin{cases}C_6H_5\\COCH_3\\H\end{cases} = C_6H_5NHCOCH_3$$

Phenylacetamid = Acetanilid

Tritt ein zweiwertiger Säurerest für zwei Wasserstoffatome des Ammoniaks ein, so nennt man die Verbindung ein Säureimid z. B.

$$C_6H_4\left\langle\begin{matrix}CO\\CO\end{matrix}\right\rangle NH \quad \text{Phtalimid.}$$

Die Säureamide sind viel schwächere Basen als die Amine, da der basische Charakter des Ammoniaks durch den Eintritt von Säureresten sehr abgeschwächt wird. Mit starken Säuren vermögen sie jedoch noch Salze zu bilden. Andererseits ist ein Wasserstoffatom in diesen Verbindungen durch Metall ersetzbar geworden z. B. unter Bildung von Natriumazetamid $CH_3-CONHNa$. Das gleiche gilt in erhöhtem Maß für das Imidwasserstoffatom der Säureimide z. B. Phtalimidkalium $C_6H_4\left\langle\begin{matrix}CO\\CO\end{matrix}\right\rangle NK$.

γ) Amidine. Wird in einer organischen Säure die Hydroxylgruppe durch NH_2, das doppelt gebundene Sauerstoffatom durch NH ersetzt, so nennt man die entstehende Verbindung ein Amidin

$$CH_3-C\begin{cases}NH_2\\NH\end{cases} \quad \text{Acetamidin.}$$

Die Amidine sind starke einsäurige Basen. In freiem Zustand sind sie unbeständig und gehen durch Aufnahme von Wasser und Abspaltung von Ammoniak leicht in Säureamide über

$$CH_3-C\begin{cases}NH_2\\NH\end{cases} + H_2O = CH_3-C\begin{cases}NH_2\\O\end{cases} + NH_3$$

Ihre Salze sind dagegen beständig.

2b) Abkömmlinge des Hydroxylamins. Vom Hydroxylamin NH_2OH lassen sich zwei Reihen von Derivaten ableiten, je nachdem man das Wasserstoffatom der Hydroxylgruppe oder die Wasserstoffatome der Aminogruppe durch organische Reste ersetzt

NH_2OCH_3	$NH(CH_3)OH$
α-Methylhydroxylamin	β-Methylhydroxylamin

Die ersteren werden als α-Derivate, die letzteren als β-Derivate bezeichnet.

Die α-Hydroxylamine werden durch Spaltung von Oximäthern erhalten

$$CH_3-C\begin{cases}H\\NOCH_3\end{cases} + H_2O = CH_3-C\begin{cases}H\\O\end{cases} + NH_2OCH_3.$$

Die β-Hydroxylamine, namentlich solche mit aromatischen Resten, entstehen als Zwischenprodukte bei der elektrolytischen

Reduktion der Nitroverbindungen, sowie durch deren Reduktion in neutraler Lösung

$$C_6H_5NO_2 + 4\,H = C_6H_5NHOH + H_2O$$

Beim Erwärmen mit starken Säuren lagern sich die schwachbasischen Hydroxylamine in die stark basischen Aminophenole um

$$C_6H_5-N\begin{smallmatrix}\diagup H\\ \diagdown OH\end{smallmatrix} \rightarrow C_6H_4\begin{smallmatrix}NH_2\\ OH\end{smallmatrix}$$

Die β-Hydroxylamine sind starke Reduktionsmittel; die α-Derivate wirken nicht reduzierend.

Abkömmlinge des Hydroxylamins sind auch die Oxime z. B. Azetaldoxim $CH_3-CH{=}NOH$, doch haben diese keine basischen Eigenschaften.

Dagegen sind die durch Anlagerung von Hydroxylamin an Nitrile entstehenden Amidoxime einsäurige Basen

$$CH_3-CN + NH_2OH = CH_3-C\begin{smallmatrix}\diagup NH_2\\ \diagdown\!\!\diagdown NOH\end{smallmatrix}$$

Beim Erwärmen mit Wasser zerfallen die Amidoxime in Säureamide und Hydroxylamin

$$CH_3-C\begin{smallmatrix}\diagup NH_2\\ \diagdown\!\!\diagdown NOH\end{smallmatrix} + H_2O = CH_3-C\begin{smallmatrix}\diagup NH_2\\ \diagdown\!\!\diagdown O\end{smallmatrix} + NH_2OH$$

2c) Abkömmlinge des Hydrazins. Die organischen Abkömmlinge des Hydrazins NH_2-NH_2 waren schon früher bekannt als dieses selbst. Je nach der Anzahl und Stellung der eintretenden organischen Reste lassen sich mehrere Reihen von Hydrazinen unterscheiden

$$RNH-NH_2 \qquad R_2N-NH_2 \qquad RNH-NHR$$
$$R_2N-NHR \qquad R_2N-NR_2$$

Die einfach substituierten Hydrazine der Fettreihe entstehen durch Reduktion und Spaltung der Nitrosoverbindungen dialkylierter Harnstoffe

$$\begin{smallmatrix}CH_3NH\\ CH_3NH\end{smallmatrix}\!>\!CO \rightarrow \begin{smallmatrix}CH_3NH\\ CH_3N-NO\end{smallmatrix}\!>\!CO \rightarrow$$
$$\begin{smallmatrix}CH_3NH\\ CH_3N-NH_2\end{smallmatrix}\!>\!CO \rightarrow CH_3NH-NH_2 + CH_3NH_2 + CO_2$$

Die einfach substituierten aromatischen Hydrazine werden durch Reduktion der Diazoverbindungen dargestellt

$$C_6H_5N_2Cl + 4\,H = C_6H_5NH-NH_2 + HCl$$

Die zweifach substituierten unsymmetrischen Hydrazine erhält man durch Reduktion von Nitrosaminen

$$(CH_3)_2N-NO + 4\,H = (CH_3)_2N-NH_2 + H_2O$$

Die zweifach substituierten symmetrischen aromatischen Hydrazine heißen Hydrazoverbindungen, da sie durch Anlagerung von Wasserstoff an Azoverbindungen entstehen

$$C_6H_5N{=}NC_6H_5 + 2H = C_6H_5NH-NHC_6H_5$$

Die Hydrazine der Fettreihe sind zweisäurige Basen, während diejenigen, welche ein oder zwei aromatische Reste an dasselbe Stickstoffatom gebunden enthalten, einsäurige Basen sind. Die Hydrazoverbindungen haben keine basischen Eigenschaften, lagern sich aber beim Erwärmen mit starken Säuren in Basen um, entweder zu Diaminodiphenylverbindungen (Benzidinumlagerung) oder zu Amino-diphenylaminen (Semidinumlagerung)

$$\underset{\text{Hydrazobenzol}}{C_6H_5NH-NHC_6H_5} = \underset{\text{Benzidin}}{NH_2C_6H_4-C_6H_4NH_2}$$

$$\underset{\text{Hydrazobenzol}}{C_6H_5NH-NHC_6H_5} = \underset{\text{Aminodiphenylamin}}{C_6H_5NH-C_6H_4NH_2}$$

Die Hydrazine haben sowohl oxydierende wie reduzierende Eigenschaften. Durch Reduktion gehen sie in Amine über

$$CH_3NH-NH_2 + 2\,H = CH_3NH_2 + NH_3$$
$$C_6H_5NH-NHC_6H_5 + 2\,H = 2\,C_6H_5NH_2$$

Bei der Oxydation geben die unsymmetrischen Hydrazine unter Stickstoffentwickelung Kohlenwasserstoffe

$$C_6H_5NH-NH_2 + O = C_6H_6 + H_2O + N_2$$

Die Hydrazoverbindungen oxydieren sich leicht zu Azoverbindungen

$$C_6H_5NH-NHC_6H_5 + O = C_6H_5N{=}NC_6H_5 + H_2O.$$

Soweit die Hydrazine noch eine nicht substituierte Aminogruppe enthalten, reagieren sie mit Aldehyden und Ketonen unter Bildung von Hydrazonen

$$C_6H_5NH-NH_2 + CH_3-C\begin{smallmatrix}\diagup H\\ \diagdown\!\!\diagdown O\end{smallmatrix} =$$
$$CH_3-C\begin{smallmatrix}\diagup H\\ \diagdown\!\!\diagdown N-NHC_6H_5\end{smallmatrix} + H_2O$$

$$C_6H_5NH-NH_2 + CO\begin{smallmatrix}\diagup CH_3\\ \diagdown CH_3\end{smallmatrix} =$$
$$C_6H_5NH-N{=}C\begin{smallmatrix}\diagup CH_3\\ \diagdown CH_3\end{smallmatrix} + H_2O$$

Diese Reaktion dient zur Erkennung und Unterscheidung der verschiedenen Aldehyde und Ketone. Besonders wichtig ist sie zum Nachweis der Zuckerarten, die außer Hydrazonen auch noch Osazone mit zwei Molekülen Hydrazin zu bilden vermögen.

Mit β-Diketonen oder Ketonsäureresten kondensieren sich die einfach substituierten Hydrazine zu Pyrazolen und Pyrazolonen (siehe den Artikel „Heterozyklische Systeme").

$$CH_3-CO-CH_2-CO\,OC_2H_5$$

NH_2 NHC_6H_5

Azetessigester + Phenylhydrazin

$$CH_3-C-CH_2-CO$$
$$= \quad \| \qquad\qquad | \qquad + C_2H_5OH + H_2O$$
$$N- \qquad N-C_6H_5$$

Methyl-phenylpyrazolon

Die an einem Stickstoffatom zweifach substituierten Hydrazine verhalten sich wie tertiäre Amine; sie vereinigen sich mit Halogenalkylen zu quaternären Hydrazoniumverbindungen

$$C_6H_5NCH_3 \quad + CH_3J = \quad C_6H_5N(CH_3)_2J$$
$$HNCH_3 \qquad\qquad HNCH_3$$

Ebenso wie in den Aminen kann auch in den Hydrazinen Wasserstoff durch Säurereste ersetzt werden. Die entstehenden Verbindungen heißen Säurehydrazide z. B. $CH_3-CONH-NH_2$ Azethydrazid.

2d) Diazoniumverbindungen. Primäre aromatische Amine reagieren mit salpetriger Säure in stark saurer Lösung unter Bildung von Diazoniumsalzen

$$C_6H_5NH_3Cl + HNO_2 = C_6H_5N_2Cl + 2H_2O$$

Nach Hantzsch kommt diesen Salzen folgende Konstitution zu

$$R-N-Cl$$
$$\|$$
$$N$$

Die daraus durch Alkali entstehenden Diazoniumhydroxyde

$$R-N-OH$$
$$|||$$
$$N$$

sind sehr unbeständig und lagern sich zu Alkalisalzen der schwach sauren Diazoverbindungen $R-N=N-OH$ um.

Die Diazoniumsalze sind sehr reaktionsfähige Stoffe und besitzen daher große Bedeutung für die Gewinnung vieler organischer Verbindungen. In festem Zustand sind sie sehr explosiv und werden deshalb meistens nur in Lösung dargestellt. Ueber die Diazoniumverbindungen kann eine Aminogruppe leicht gegen Wasserstoff, Hydroxyl, Halogen usw. ausgetauscht werden

$$C_6H_5N_2Cl + C_2H_5OH = C_6H_6 + C_2H_4O + HCl + N_2$$
$$C_6H_5N_2Cl + H_2O = C_6H_5OH + HCl + N_2$$
$$C_6H_5N_2Cl + KBr = C_6H_5Br + KCl + N_2$$

Durch Einwirkung primärer oder sekundärer Amine entstehen Diazoaminoverbindungen, die sich zu Aminoazoverbindungen umlagern können

$$C_6H_5N_2Cl + C_6H_5NH_2 =$$
Diazoniumchlorid + Anilin
$$C_6H_5N_2-NH-C_6H_5 + HCl$$
Diazoaminobenzol
$$C_6H_5-N=N-NH-C_6H_5 =$$
Diazoaminobenzol
$$C_6H_5-N=N-C_6H_4-NH_2$$
Aminaozobenzol

Mit tertiären Aminen entstehen sofort Aminoazoverbindungen

$$C_6H_5N_2Cl + C_6H_5N(CH_3)_2 =$$
Diazoniumchlorid + Dimethylanilin
$$C_6H_5-N=N-C_6H_4-N(CH_3)_2$$
Dimethylaminobenzol

Mit Phenolen bilden sich in gleicher Weise Oxyazoverbindungen

$$C_6H_5N_2Cl + C_6H_5OH$$
$$C_6H_5-N=N-C_6H_4-OH$$

Durch Reduktion gehen die Diazoniumverbindungen in Hydrazinsalze über

$$C_6H_5N_2Cl + 4H = C_6H_5-NH-NH_3Cl$$

2e) Zyklische Stickstoffbasen. In vielen Iminen und Säureimiden bildet das Stickstoffatom das Glied eines Ringsystems. Solcher stickstoffhaltiger zyklischer Verbindungen gibt es eine sehr große Zahl, darunter auch solche, bei denen zwei oder mehr Stickstoffatome an der Ringbildung teilnehmen

```
HC —— CH          H              H2
||    ||          C             C
HC    CH       HC   CH      H2C   CH2
  \  /         HC   CH      H2C   CH2
   N              N             N
   H                            H
 Pyrrol         Pyridin       Piperidin

   H    H              H    H    H
   C    C              C    C    C
HC   C    CH        HC   C    C    CH
HC   C    CH        HC   C    C    CH
   C    N              C    N    C
   H                   H         H
 Chinolin                Akridin

                          H
      N                   N
  HC     CH          H2C     CH2
  HC     CH          H2C     CH2
      N                   N
                          H
   Pyrazin             Piperazin

   H                   H         H
   C    N              C    N    C
HC   C    CH        HC   C    C    CH
HC   C    CH        HC   C    C    CH
   C    N              C    N    C
   H                   H         H
 Chinoxalin             Phenazin

 HC —— N             HC     N
 ||    |             ||     ||
 N     CH            N      N
    N                   N
    H                   H
 Triazol             Tetrazol
```

Alle diese Verbindungen sind Basen. Enthalten sie eine NH-Gruppe, so verhalten sie sich wie sekundäre, sind alle drei Wertigkeiten des Stickstoffatoms an Kohlenstoff gebunden, wie tertiäre Amine. Die Verbindungen mit fünfwertigem Stickstoff entsprechen den quaternären Ammoniumbasen.

Ueber Bildungsweisen und Eigenschaften dieser Basen siehe die Artikel „Heterozyklische Systeme“, ferner „Akridin“, „Alkaloide“, „Azine“, „Chinolingruppe“, „Pyridingruppe“.

3. Phosphor-, Arsen- und Antimonbasen. Ebenso wie im Ammoniak lassen sich auch im Phosphor-, Arsen- und Antimonwasserstoff die Wasserstoffatome durch organische Reste ersetzen. Die Abkömmlinge des Phosphorwasserstoffs heißen Phosphine, diejenigen des Arsenwasserstoffs Arsine und die des Antimonwasserstoffs Stibine. Ihnen schließen sich die quaternären Phosphonium-, Arsonium- und Stiboniumverbindungen an.

Entsprechend den geringeren basischen Eigenschaften der Wasserstoffverbindungen selbst sind auch ihre organischen Abkömmlinge schwächere Basen als die analogen Stickstoffverbindungen. Doch nimmt auch hier der basische Charakter mit der Zahl der eingetretenen Alkylreste zu. Die Salze der primären Phosphine werden bereits durch Wasser, die der sekundären und tertiären durch Alkalien zersetzt. Die quaternären Phosphoniumbasen sind stärker als Kaliumhydroxyd und können aus ihren halogenwasserstoffsauren Salzen nur durch feuchtes Silberoxyd freigemacht werden

$$P(CH_3)_4J + AgOH = P(CH_3)_4OH + AgJ$$

Beim Arsen und Antimon sind primäre und sekundäre Verbindungen nicht bekannt; die tertiären haben keinen basischen Charakter, wohl aber die daraus durch Anlagerung von Halogenalkyl und Zerlegung mit Silberoxyd darstellbaren Arsonium- und Stiboniumhydroxyde.

Auch die durch Oxydation der tertiären Verbindungen entstehenden Phosphin-, Arsin- und Stibinoxyde sind Basen.

3a) Basische Verbindungen des Phosphors. Die jodwasserstoffsauren Salze primärer und sekundärer Phosphine entstehen beim Erhitzen von Phosphoniumjodid mit Alkyljodiden bei Gegenwart von Zinkoxyd

$$2PH_4J + 2CH_3J + ZnO = P(CH_3)H_3J + ZnJ_2 + H_2O$$

$$PH_4J + 2CH_3J + ZnO = P(CH_3)_2H_2J + ZnJ_2 + H_2O.$$

Läßt man das Zinkoxyd weg, so bilden sich die Jodide tertiärer Phosphine und quaternäre Phosphoniumjodide

$$PH_4J + 3CH_3J = P(CH_3)_3HJ + 3HJ$$

$$PH_4J + 4CH_3J = P(CH_3)_4J + 4HJ$$

Tertiäre Phosphine entstehen auch durch Einwirkung von Halogenalkylen auf Phosphor alcium

$$P_2Ca_3 + 6CH_3J = 2P(CH_3)_3 + 3CaJ_2$$

Ferner auch aus Zinkalkylen und Phosphortrichlorid

$$2PCl_3 + 3Zn(CH_3)_2 = 2P(CH_3)_3 + 3ZnCl_2$$

Mit Ausnahme des gasförmigen Methylphosphins sind die Phosphine farblose, stark lichtbrechende Flüssigkeiten von einem durchdringenden, betäubenden Geruch. Sie nehmen leicht Sauerstoff auf, die niedrigeren so energisch, daß sie sich an der Luft von selbst entzünden. Die primären Phosphine gehen hierbei in Alkylphosphosäuren, die sekundären in Dialkylphosphinsäuren, die tertiären in Phosphinoxyde über, indem der Phosphor in allen Fällen fünfwertig wird.

$$P\begin{cases}CH_3\\H\\H\end{cases} + 3O = O{=}P\begin{cases}CH_3\\OH\\OH\end{cases}$$

Methylphosphin Methylphosphorsäure

$$P\begin{cases}CH_3\\CH_3\\H\end{cases} + 2O = O{=}P\begin{cases}CH_3\\CH_3\\OH\end{cases}$$

Dimethylphosphin Dimethylphosphinsäure

$$P\begin{cases}CH_3\\CH_3\\CH_3\end{cases} + O = O{=}P\begin{cases}CH_3\\CH_3\\CH_3\end{cases}$$

Trimethylphosphin Trimethylphosphinoxyd

Auch mit Schwefel und Schwefelkohlenstoff, sowie mit Halogenen verbinden sich die Phosphine leicht.

Die Phosphinoxyde sind starke zweisäurige Basen.

3b) Basische Verbindungen des Arsens. Wie schon erwähnt, haben die allein bekannten tertiären Arsine keine basischen Eigenschaften, wohl aber die daraus entstehenden Arsoniumhydroxyde und Arsinoxyde

$$As(CH_3)_3 + CH_3J = As(CH_3)_4J$$

$$As(CH_3)_3 + O = As(CH_3)_3O$$

Auch das beim Erhitzen von arseniger Säure mit Kaliumazetat sich bildende Kakodyloxyd ist eine starke Base

$$4CH_3{-}COOK + As_2O_3 = \begin{matrix}(CH_3)_2As\\(CH_3)_2As\end{matrix}\Big>O + 2K_2CO_3 + 2CO_2$$

Es zeichnet sich durch einen äußerst durchdringenden, betäubenden Geruch aus, so daß seine Bildung eine sehr empfindliche Reaktion sowohl auf arsenige Säure wie auf Essigsäure ist.

3c) Basische Verbindungen des Antimons. Auch beim Antimon kennt man nur die tertiären Stibine, die ebenfalls keine Basen sind. Durch An-

lagerung von Halogenalkyl geben sie Salze der stark basischen Stiboniumverbindungen

$$Sb(CH_3)_3 + CH_3J = Sb(CH_3)_4J$$

Durch Oxydation gehen sie in die gleichfalls basischen Stibinoxyde über

$$Sb(CH_3)_3 + O = Sb(CH_3)O$$

4. Schwefel-, (Selen-, Tellur-)Basen. Thioäther (sowie auch die entsprechenden Selen- und Tellurverbindungen) vereinigen sich leicht mit Halogenalkylen zu kristallinischen Verbindungen, die den halogenwasserstoffsauren Salzen der Ammonium- und Phosphoniumbasen entsprechen und daher auch als Sulfoniumsalze (Sulfinsalze) bezeichnet werden

$$(CH_3)_2S + CH_3J = (CH_3)_3SJ$$

Mit Silberoxyd erhält man daraus die Sulfoniumhydroxyde (Sulfinbasen) z. B. $(CH_3)_3SOH$ Trimethylsulfoniumhydroxyd, starke Basen, die an der Luft Kohlensäure anziehen und mit Säuren beständige Salze bilden. Sowohl ihre Salze wie auch die freien Basen sind in Wasser leicht löslich, die letzteren reagieren stark alkalisch.

Das Schwefelatom ist in diesen Verbindungen vierwertig.

Sind in diesen Basen oder Salzen die drei organischen Reste alle verschieden, so hat man als Gegenstück zu einem asymmetrischen Kohlenstoffatom ein asymmetrisches Schwefelatom. In solchen Fällen sind zwei stereoisomere Verbindungen dargestellt worden

```
     R1              R1
     |               |
R3—S—R2         R2—S—R3
     |               |
     OH              OH
```

Ebenso wie die entsprechenden Kohlenstoffverbindungen unterscheiden diese sich durch ihr Verhalten gegen polarisiertes Licht.

Durch Oxydation gehen die Thioäther in Sulfoxyde über

$$(CH_3)_2S + O = (CH_3)_2SO$$

Die Sulfoxyde besitzen ebenfalls basische Eigenschaften. Sie bilden mit starken Säuren Salze, die jedoch teilweise durch Wasser wieder zerlegt werden

$$(CH_3)_2SO + HNO_3 \rightleftarrows (CH_3)_2S\begin{cases} NO_3 \\ OH \end{cases}$$

$$(CH_3)_2SO + 2HBr \rightleftarrows (CH_3)_2SBr_2 + H_2O$$

5. Basische Verbindungen des Jods. Aromatische Jodverbindungen lagern leicht zwei Atome Chlor an unter Bildung von Jodidchloriden z. B. Phenyljodidchlorid $C_6H_5JCl_2$.

Bei der Behandlung mit Alkalien geben diese Jodosoverbindungen

$$C_6H_5JCl_2 + 2KOH = C_6H_5JO + 2KCl + H_2O$$

Die Jodosoverbindungen sind zweisäurige Basen von eigentümlichem Geruch. Beim Erhitzen explodieren sie leicht. Mit Salzsäure gehen sie wieder in die Jodidchloride über $C_6H_5JO + 2\,HCl = C_6H_5JCl_2 + 2\,H_2O$. Durch Oxydation gehen sie in die nicht mehr basischen Jodoverbindungen über

$$C_6H_5JO + O = C_6H_5JO_2.$$

Behandelt man eine Mischung gleicher Moleküle Jodoso- und Jodoverbindung mit Silberoxyd, so erhält man die stark basischen Jodonium-(Jodinium-)hydroxyde

$$C_6H_5JO + C_6H_5JO_2 + AgOH = (C_6H_5)_2JOH + AgJO_3.$$

Mit Säuren vereinigen diese sich zu beständigen Salzen z. B. Jodoniumchlorid $(C_6H_5)_2JCl$.

6. Oxoniumsalze. Friedel hat bereits 1875 beobachtet, daß sich Methyläther mit Salzsäure zu einem Salz vereinigt. Später sind derartige Sauerstoffsalze noch mehrfach beobachtet worden. Aber erst die Entdeckung der gut kristallisierenden Salze des Dimethylpyrons z. B.

```
         CO
        /  \
      HC    CH
      ||    ||
   CH3C    CCH3
        \  /
         O
        / \
       H   Cl
```

durch Collie und Tickle war für die Auffassung dieser Verbindungen als Salze des vierwertigen Sauerstoffs entscheidend. Baeyer und Villiger zeigten dann, daß alle organischen Sauerstoffverbindungen imstande sind solche Oxoniumsalze zu bilden, von denen diejenigen mit komplexen Säuren wie Ferro- und Ferricyanwasserstoffsäure besonders beständig sind.

7. Basische Eigenschaften des Kohlenstoffs. Triphenylmethyl $(C_6H_5)_3C$ sowohl wie Triphenylkarbinol $(C_6H_5)_3COH$ vereinigen sich mit starken Säuren zu Salzen. Nach Kehrmann und Wentzel beruht dies auf der Anwesenheit eines zweiwertigen Kohlenstoffatoms (*), das bei der Salzbildung vierwertig wird

```
                   H  H
  C6H5\          C=C\  *  /H
       >C=C<           C<
  C6H5/          C=C/     \Cl
                   H  H
```

Baeyer und Villiger nehmen da-

gegen an, daß sich das Triphenylmethyl wie ein einwertiges Metall verhält, dessen Hydroxyd das Triphenylkarbinol ist. Dieses bildet mir Säuren Salze genau so, wie dies bei den Ammoniumbasen der Fall ist

$$(C_6H_5)_3COH + HCl = (C_6H_5)_3CCl + H_2O.$$

Sie nennen daher diese Verbindungen Carboniumsalze.

8. Pseudobasen. Versetzt man eine salzsaure Lösung von Kristallviolett (Hexamethyl-triamino-triphenylmethan)

$$[(CH_3)_2N-C_6H_4)]_2C=C_6H_4=N\begin{matrix}\diagup (CH_3)_2 \\ \diagdown Cl\end{matrix}$$

mit einem Aequivalent Alkali, so erhält man zunächst eine gefärbte, stark alkalisch reagierende Flüssigkeit, deren elektrische Leitfähigkeit viel größer ist, als dem gebildeten Alkalisalz entspricht. Nach einiger Zeit entfärbt sie sich, reagiert dann nicht mehr alkalisch und zeigt nur die Leitfähigkeit des gelösten Alkalisalzes. Nach Hantzsch ist diese Erscheinung so zu erklären, daß durch den Zusatz des Alkalis zuerst eine echte Ammoniumbase $[(CH_3)_2N-C_6H_4]_2C=C_6H_4=N\begin{matrix}\diagup (CH_3)_2 \\ \diagdown OH\end{matrix}$ freigemacht wird. Diese lagert sich allmählich in die Verbindung $[(CH_3)_2N-C_6H_4]_2=C\begin{matrix}\diagup C_6H_4-N(CH_3)_2 \\ \diagdown OH\end{matrix}$ um. Letztere nennt Hantzsch eine Pseudobase, da sie aus einem Salz durch Alkali freigemacht wird, aber nicht alkalisch reagiert. Solche Pseudobasen lassen sich aus vielen organischen Farbstoffen, namentlich der Diphenyl- und Triphenylmethylreihe, darstellen. Mit Säuren vereinigen sie sich wieder zu normalen Salzen.

Literatur. ***F. Beilstein,*** *Handbuch der organischen Chemie. 3. Aufl., Hamburg und Leipzig 1893.* — ***F. Henrich,*** *Neuere theoretische Anschauungen auf dem Gebiete der organischen Chemie. Braunschweig 1908.* — ***E. Fromm und F. Raiziss,*** *Die basischen Eigenschaften der Sulfoxyde. Liebigs Ann. 374, 90, 1910.* — ***P. Walden,*** *Ueber die basischen Eigenschaften des Sauerstoffs. Ber. Dtsch. Chem. Ges. 34, 4185, 1901.* — ***A. Baeyer und V. Villiger,*** *Ueber die basischen Eigenschaften des Sauerstoffs. Ber. Dtsch. Chem. Ges. 35, 1201, 1902.* — ***F. Kehrmann und F. Wenzel,*** *Ueber die basischen Eigenschaften des Kohlenstoffs. Ber. Dtsch. Chem. Ges. 34, 3815, 1901.* — ***A. Baeyer,*** *Die basischen Eigenschaften des Kohlenstoffs. Ber. Dtsch. Chem. Ges. 38, 570, 1905.* — ***M. Gomberg und L. H. Cone,*** *Zur Kenntnis der Chinokarboniumsalze. Liebigs Ann. 376, 183, 1910.* — ***A. Hantzsch und G. Osswald,*** *Ueber die Umwandlung von Farbbasen in Pseudoammoniumhydrate. Ber. Dtsch. Chem. Ges. 33, 278, 1900.* — ***A. Hantzsch,*** *Zur Kenntnis der Salze und Basen aus Triphenylmethanfarbstoffen. Ber. Dtsch. Chem. Ges. 33, 752, 1900.* — ***A. Hantzsch,*** *Ueber die Natur der Basen aus Triphenylmethanfarbstoffen. Ber. Dtsch. Chem. Ges. 37, 3434, 1907.*

W. Meigen.

Bastardierung.

1. Definition. 2. Grenzen der Bastardierungsmöglichkeit. 3. Ursachen der Unmöglichkeit einer Bastardierung. 4. Vererbungsgesetze: a) Rassenbastarde; b) Artbastarde. 5. Falsche Bastarde. Pseudogamie. 6. Bedeutung der Bastardierung für die Artbildung. 7. Xenien. Telegonie. Pfropfbastarde. 8. Bastardierung in der Züchtungspraxis.

1. Definition. Bastardierung (Kreuzung) ist die Erzeugung eines neuen Individuums (= Bastard, Mischling, Hybrid, Blendling, Blendart) durch die geschlechtliche Vereinigung zweier in ihren erblichen Eigenschaften verschiedener Eltern. Eine irgendwie scharfe Abgrenzung zwischen Bastardierung und gewöhnlicher Kreuzbefruchtung innerhalb einer „Art" ist nicht möglich, weil zu einer Art zahllose erblich verschiedene Sippen gehören können.

2. Grenzen der Bastardierungsmöglichkeit. Eine geschlechtliche Fortpflanzung und damit eine Bastardierung ist im allgemeinen ohne Hindernisse möglich zwischen Angehörigen einer und derselben Großart, d. h. Spezies im Linnéischen Sinne, meist auch noch zwischen den Angehörigen zweier nah verwandter Arten. So gelingt z. B. leicht eine Kreuzung zwischen den verschiedenen Varietäten des Gartenkohls (Brassica oleracea L.) wie Kopfkohl, Kohlrabi, Rosenkohl usw. Ferner sind auch noch Brassica napus L. und Brassica rapa L. zwei nahe verwandte Arten, miteinander leicht kreuzbar. Aber schon Kreuzungen zwischen Brassica napus (Kohlrübe) und Brassica oleracea (Kohl) verlaufen meistens ergebnislos. Die Möglichkeit von Kreuzungen und die systematische Verwandtschaft d. h. morphologische Aehnlichkeit gehen aber durchaus nicht immer einander parallel.

So gelingt die Kreuzung der verschiedenen Elementararten (petites espèces) von Draba verna (Hungerblümchen) sehr ungleich leicht, diejenige mancher von ihnen überhaupt nicht.

Man findet ferner sehr häufig die Erscheinung, daß zwischen zwei Arten nur eine der beiden möglichen reziproken Kreuzungen Erfolg hat. So ist es möglich ein Gras, Aegilops ovata mit Pollen von Triticum vulgare (Weizen) zu befruchten und einen

Bastard zu erzeugen, während die Befruchtung von Triticum durch Aegilops keine Nachkommen ergibt.

Zwischen Arten, die von den Systematikern zu verschiedenen Gattungen gerechnet werden, ist in der großen Mehrzahl der Fälle eine Bastardierung nicht möglich. Immerhin sind aber doch schon zahlreiche „bigenere" Bastarde bekannt, in großer Zahl bei den Enten, wo z. B. die Kreuzung von Anas boschas (Stockente) und Cairina moschata (Türkenente) leicht Bastarde ergibt, ferner den Fasanen, z. B. zwischen Jagdfasan Phasianus colchicus und Goldfasan Chrysolophus pictus und von Pflanzen in besonders großer Menge bei den Orchideen.

Bastardierungen zwischen den Angehörigen verschiedener Familien führen nur sehr selten (bei Enten und Fasanen z. B.) zu ausgebildeten lebensfähigen Organismen.

Zusammenfassende Angaben über die verschiedene Neigung der einzelnen untersuchten Arten zur Erzeugung von Spezies- und Gattungsbastarden finden sich in den unten genannten Büchern von Ackermann und Przibram für Tiere und von Focke für Pflanzen.

3. Ursachen der Unmöglichkeit einer Bastardierung. Sie sind sehr verschieden. Bei Tieren spielen instinktive Abneigung — Beispiel: der Duft eines Schmetterlingsweibchen lockt die eigenen Männchen an, aber nicht die einer anderen Art — Nichtzusammenpassen der beiderseitigen Sexualorgane — bei Käfern z. B. — Größenunterschiede und anderes eine große Rolle. Bei Pflanzen können ähnliche äußere Hemmnisse eine Bastardierung verhindern, indem z. B. zwei Arten zu verschiedenen Jahreszeiten blühen, oder so verschiedene Blüten haben, daß die Pollenübertragung durch Insekten von der einen auf die andere nicht möglich ist. Künstlich kann man häufig derartige äußere Hemmnisse beseitigen, man kann z. B. einem Mausweibchen Sperma einer Ratte injizieren, oder man kann Pflanzenarten, die durch Insekten nicht kreuzbefruchtet werden können, auf andere Weise untereinander bestäuben, und kann so doch Bastarde erhalten. Sehr oft sind aber die Hemmnisse, die einer Bastardierung entgegenstehen, nicht so leicht erkennbar, sondern beruhen auf komplizierteren Prozessen, etwa darauf, daß zwischen Eiern und Spermatozoen zweier verschiedener Spezies nicht die chemotaktischen Reizwirkungen spielen, die bei dem Zusammentreffen gleichartiger Sexualzellen die Vereinigung herbeiführen. Eine dritte ebenfalls oft vorkommende Ursache der Unmöglichkeit einer Bastardierung ist die, daß zwar eine Vereinigung der Sexualzellen noch erfolgt, daß aber der so entstandene Embryo sehr früh abstirbt. Exakte neuere Untersuchungen über diese Spezialfrage liegen leider nicht vor.

4. Vererbungsgesetze der Bastarde. 4a) Rassenbastarde. Für die Beschaffenheit der Bastarde selbst und für das Verhalten ihrer Nachkommenschaft gelten sehr verwickelte Gesetze, mit deren Studium man heute eifrig beschäftigt ist, und deren Kenntnis die Grundlage für ein Verständnis des ganzen Wesens der Vererbung zu geben verspricht.

Den Weg für ein tieferes Eindringen in dieses Gebiet haben die grundlegenden Entdeckungen des Augustinermönchs Gregor Mendel gebahnt. Das Verdienst die ganz in Vergessenheit geratenen von Mendel gefundenen Gesetze selbständig und unabhängig voneinander (ums Jahr 1900) neu entdeckt zu haben, gebührt den Botanikern C. Correns, E. Tschermak und H. de Vries.

Um diese Gesetze verstehen zu können, geht man am besten aus von einer Kreuzung zwischen zwei Rassen, die nur einen sich selbständig vererbenden Unterschied aufweisen. Wir kreuzen etwa zwei Individuen von Antirrhinum majus (dem Gartenlöwenmaul) und zwar ein elfenbeinfarbiges (Fig. 1a) aus einer konstant elfenbeinfarbigen Rasse und ein rotes (Fig. 1b) aus einer konstanten roten Rasse. Für diese beiden Individuen führen wir eine bestimmte Bezeichnung mit Buchstaben ein: Jede Pflanze entsteht als das Produkt der Vereinigung zweier Sexualzellen. Eine Sexualzelle einer konstant roten Rasse wollen wir mit F und die durch die Vereinigung zweier solcher Sexualzellen entstandene rote Pflanze mit FF bezeichnen. Ganz entsprechend sollen die Sexualzellen der elfenbeinfarbigen Pflanze f und sie selbst ff heißen. Wenn wir einen Bastard zwischen einem roten Individuum FF und einem elfenbeinfarbigen ff erzeugen, indem wir eine weibliche Sexualzelle F sich vereinigen lassen mit einer männlichen f, oder was ganz einerlei ist, eine weibliche Sexualzelle f mit einer männlichen F, so erhalten wir ein Individuum mit der Bezeichnung Ff, oder fF, d. h. einen Bastard oder wie der Terminus heißt ein heterozygotisches (durch Vereinigung ungleichartiger Sexualzellen entstandenes) Individuum. Im Gegensatz dazu heißt man ein Individuum, das durch die Vereinigung zweier gleichartiger Sexualzellen entstanden ist, homozygotisch. Ein solcher Antirrhinum-Bastard wird nun weder elfenbeinfarbig wie der eine Elter, noch rot wie der andere, sondern blaßrot blühen (Fig. 1c). Er hat nur von dem einen — dem roten —

Elter her die „Fähigkeit zur Bildung roter Blütenfarbe“ geerbt, und das äußert sich darin, daß er eine wesentlich blassere Farbe aufweist. Soweit ist an dem nichts unerwartetes, um so auffälliger ist aber das Verhalten der Nachkommenschaft eines solchen Bastards.

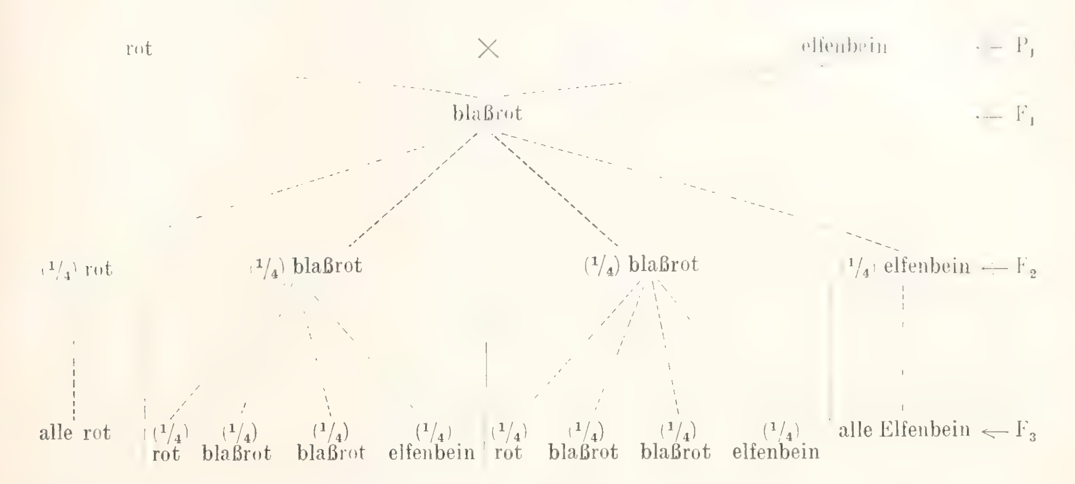
Wenn wir eine Anzahl Bastarde sich untereinander befruchten lassen, oder wenn wir, was ohne Schaden ausführbar ist, ein Individuum mit seinem eigenen Blütenstaub befruchten, dann erhalten wir eine Nachkommenschaft, die aus dreierlei verschiedenen Individuen besteht. Ein Teil dieser Bastardkinder hat rote Blüten genau wie der eine Elter, ein zweites Teil hat elfenbeinfarbige Blüten wie der andere Elter und ein dritter Teil hat blaßrote Blüten wie der ursprüngliche Bastard (Fig. 1d bis f). Wenn man viele solche Individuen (Enkel der ursprünglich gekreuzten Pflanzen) großzieht, dann kann man leicht feststellen, daß diese drei Kategorien, die roten, blaßroten und elfenbeinfarbigen Pflanzen untereinander im Ver-



Fig. 1. Kreuzung einer elfenbeinfarbigen (a) mit einer roten (b) Rasse von Antirrhinum majus. c der blaßrote Bastard. d bis f die 3 in der Nachkommenschaft eines solchen Bastardes auftretenden Typen.

hältnis von 1:2:1 stehen d. h. von 100 Pflanzen werden etwa 25 rot, 50 blaßrot und 25 elfenbeinfarbig sein. Die konkreten Zahlen aus einem Versuch von 97 Pflanzen sind z. B. 22 rot, 52 blaßrot und 23 elfenbeinfarbig.

Die auf diese Weise gewonnenen roten Individuen erweisen sich in ihrer Deszendenz als völlig konstant, geben ausschließlich eine rote Nachkommenschaft, die elfenbeinfarbigen sind ebenfalls konstant, aber die blaßroten Individuen verhalten sich in ihrer Deszendenz genau wie der erste ursprüngliche Bastard F f, d. h. spalten wieder auf in $^1/_4$ rote, $^2/_4$ blaßrote und $^1/_4$ elfenbeinfarbige Nachkommen. In Form eines Stammbaumes ist der Versuch folgendermaßen darstellbar:



Man bezeichnet mit den hier ebenso wie in Fig. 1 an der rechten Seite beigedruckten Buchstaben P_1, F_1, F_2, F_3 folgendes: P_1 ist erste Parentalgeneration, d. h. die ursprünglich zur Kreuzung verwendeten Individuen, F_1 ist die erste Filialgeneration, d. h. die primären Bastarde F_2, F_3 usw. sind die späteren Bastardgenerationen. Ganz entsprechend ist P_2 die Elterngeneration von P_1 usw.

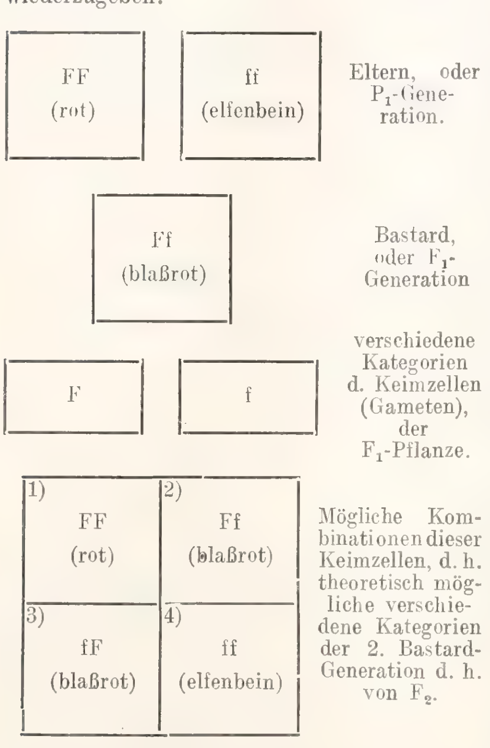
Ein Verständnis dieser ganzen eigentümlichen Spaltungserscheinungen dieser „alternativen Vererbung" gibt die von Mendel aufgestellte, heute allgemein angenommene Hypothese, daß jeder derartige Bastard zweierlei Arten von Sexualzellen bildet, nämlich 50% väterliche und 50% mütterliche. Nach der Theorie bildet unser Antirrhinum-Bastard F f zweierlei Arten von Sexualzellen und zwar ist die eine Hälfte davon ganz genau von der Art F, die ganz ebenso wie die Sexualzellen einer homozygotischen FF-Pflanze die „Fähigkeit zur Bildung roter Farbe" übertragen, und die andere Hälfte seiner Sexualzellen ist genau gleich den Sexualzellen f der elfenbeinfarbigen Rasse ff. Wenn wir den Bastard mit seinem eigenen Blütenstaub befruchten, oder wenn wir mehrere solcher Bastarde einander gegenseitig befruchten lassen, dann können die beiden verschiedenen Kategorien F und f von Sexualzellen sich in 4 verschiedenen Weisen kombinieren:

Eine Eizelle F kann treffen ein Pollenkorn F und gibt ein Individuum FF, das rot blüht
„ „ F „ „ „ „ f und gibt ein Individuum Ff, das blaßrot blüht
„ „ f „ „ „ „ F und gibt ein Individuum fF, das blaßrot blüht
„ „ f „ „ „ „ f und gibt ein Individuum ff, das elfenbeinfarbig blüht.

Alle 4 möglichen Kombinationen haben die gleiche Wahrscheinlichkeit, wir werden darum erwarten dürfen, daß in der Deszendenz eines solchen Bastardes die 4 möglichen Kombinationen gleich häufig verwirklicht werden, und daß dem entsprechend diese 4 verschiedenen Arten von Individuen FF, Ff, fF, ff, in annähernd gleichen Verhältnissen vorkommen werden. Theoretisch ist daher zu erwarten, daß die Nachkommenschaft eines solchen Bastardes zusammengesetzt sein wird aus:

$^1/_4$ Individuen, entstanden als F × F homozygotisch konstant rot
" " " " F × f } heterozygotisch blaßrote Bastarde
" " " " f × F }
" " " " f × f homozygotisch konstant elfenbein.

In Form eines Schemas pflegt man einen solchen Kreuzungsversuch folgendermaßen wiederzugeben:



Es ist möglich gewesen, auf Grund der Theorie auch das Resultat von weiteren Versuchen vorherzusagen und so die Theorie zu prüfen. Das gilt besonders für die Rückkreuzung eines Bastardes: wir befruchten etwa unseren Bastard Ff mit Blütenstaub der elfenbeinfarbigen Elternpflanze ff oder einer anderen elfenbeinfarbigen Pflanze der gleichen Sippe. Nach der Hypothese produziert der Bastard zweierlei Eizellen, die eine Hälfte der Eizellen überträgt nur das Merkmal rote Blütenfarbe, die andere Hälfte überträgt nur das Merkmal elfenbein Blütenfarbe. Wenn wir einen solchen Bastard befruchteten mit einer ff Pflanze, deren Pollenkörner sämtlich nur das Merkmal elfenbeinfarbige Blüte übertragen, dann müssen 50% der so entstehenden Nachkommen gebildet werden durch Vereinigung einer F-Eizelle mit einem f Pollenkorn und 50% durch die Vereinigung einer f-Eizelle mit einem f-Pollenkorn. Es müssen demnach bei einer solchen Rückkreuzung entstehen: 50% Pflanzen von der Formel Ff d. h. blaßrote Heterozygoten und 50% Pflanzen von der Formel ff d. h. elfenbeinfarbige weiterhin konstant bleibende Pflanzen. Das auf Grund der Theorie vorherzusagende Ergebnis trifft auch tatsächlich ein, man erhält in entsprechenden Versuchen zu fast gleichen Teilen einerseits elfenbeinfarbige, weiterhin konstante, und andererseits blaßrote weiterhin aufmendelnde Pflanzen.

In dem eben gebrauchten Beispiele sind die Bastarde leicht an ihrer blaßroten Farbe zu erkennen. Die Bastarde nehmen also gewissermaßen eine Art Mittelstellung zwischen den Eltern ein, sind „intermediäre" Bastarde. So ist die Sachlage zwar sehr häufig aber durchaus nicht immer. Das Aussehen der Heterozygoten kann auch ein ganz anderes sein. Sehr eigenartige Verhältnisse finden sich z. B. bei der Kreuzung von zwei Hühnerrassen, kreuzt man eine gewisse Sorte schwarzer Andalusierhühner mit einer anderen schwarzweiß gescheckten, so erhält man Bastarde, die eine ganz von der der Eltern abweichende — von den Liebhabern als blau bezeichnete — Färbung haben. Wenn man derartige „blaue Andalusier" unter sich kreuzt, dann erhält man ganz regelmäßig eine F_2-Generation, die zu $^1/_4$ aus schwarzen, $^1/_4$ aus schwarzweißen und $^2/_4$ aus blauen Tieren sich zusammensetzt. Die schwarzen und die schwarzweißen Tiere erweisen sich bei Inzucht als homozygotisch, die blauen spalten weiter in dem alten Verhältnis auf. Man hat vielfach dieses Auftreten der blauen Farbe so gedeutet, daß in den Bastarden die beiderelterlichen Merkmale fein verteilt mosaikartig nebeneinander zur Ausbildung kämen (Mosaikbastarde). Die scheinbar neue Farbe der blauen Andalusier wäre dann nur im Fall von Mosaikbildung, wie sie auch noch für einzelne Bastarde angegeben wird; so sollen gelegentlich die Bastarde zwischen schwarzen und weißen Hühnern schwarzweiß gefleckt sein. Völlig einwandfrei untersucht sind aber diese zuletzt genannten Mosaikbastarde noch nicht.

Ein dritter Fall, der ganz besonders häufig vorkommt, ist der, daß die Heterozygoten ganz dem einen Elter gleichen „goneoklin" sind, z. B. wenn wir eine schwarze Maus kreuzen mit einer weißen, so erhalten wir Bastarde, die schwarz aussehen und äußerlich nicht von den homozygotisch schwarzen Tieren zu unterscheiden sind. F_2 einer solchen Kreuzung besteht demnach äußerlich betrachtet zu $^3/_4$ aus schwarzen und zu $^1/_4$ aus weißen Tieren. Eine Prüfung der Deszendenz der schwarzen

Tiere zeigt aber, daß auch hier ein Teil von ihnen homozygotischschwarz ist und konstante Deszendenz hat, zwei andere Teile von ihnen auch weiterhin spalten. Auch hier sind also in Wirklichkeit die Verhältnisse die gleichen wie bei den vorhin besprochenen Bastarden zwischen den roten und den elfenbeinfarbigen Löwenmäulchen.

Diese Erscheinung, daß viele Bastarde äußerlich von den Eltern nicht zu unterscheiden sind, bezeichnet man mit dem Wort Dominanz. Man sagt, das eine Merkmal, hier etwa die „Fähigkeit zur Bildung schwarzer Haarfarbe" dominiere über das andere Merkmal, über das Fehlen dieser Fähigkeit und dieses letztere Merkmal sei rezessiv gegen das erstere. Man hat dieser Dominanzerscheinung, die durchaus keine allgemeine Regel ist, vielfach übertrieben große Bedeutung zugeschrieben, von einer Dominanzregel gesprochen. Das ist ganz verkehrt, eine irgendwie gültige Dominanzregel gibt es nicht, und sehr häufig ist eine Dominanz nur äußerlich, man kann bei ganz genauem Zusehen auch bei scheinbarer völliger Dominanz die Homozygoten noch von den Heterozygoten unterscheiden.

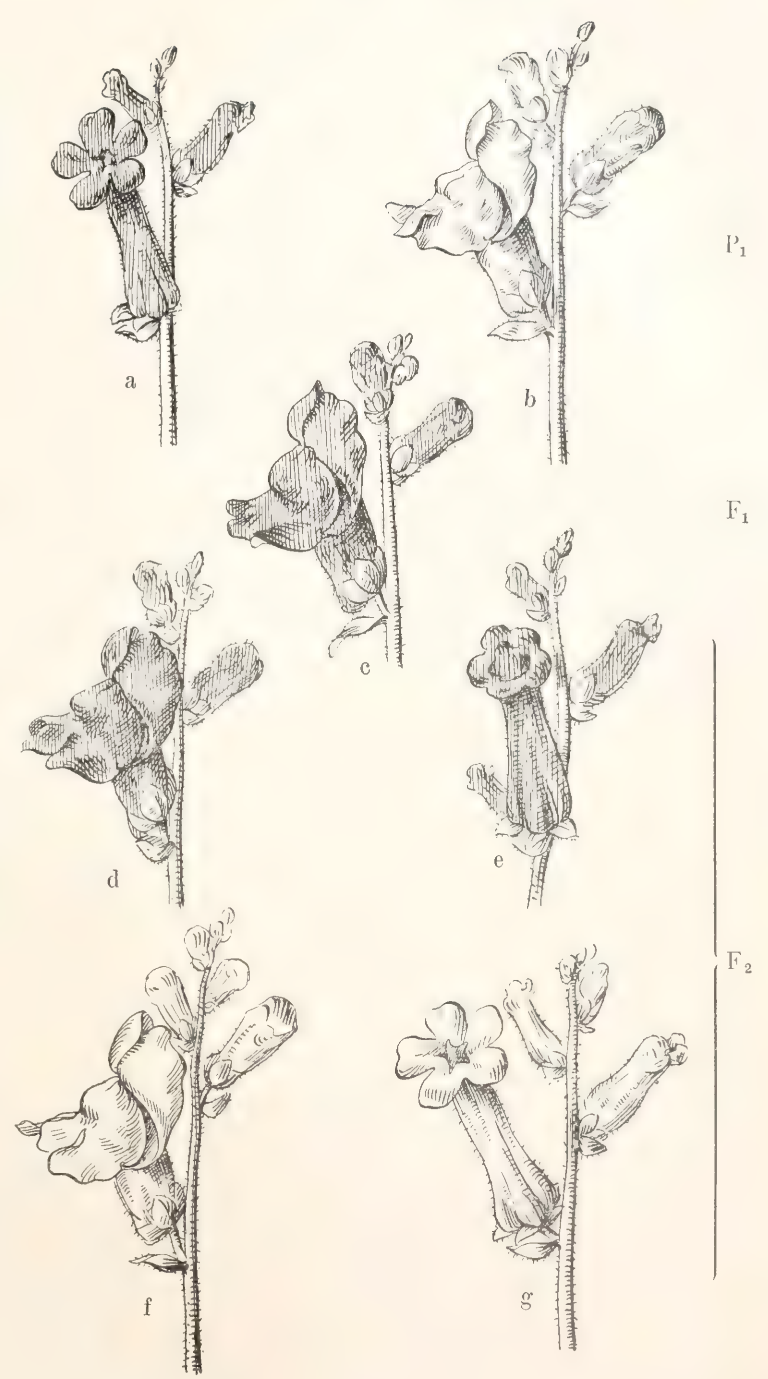


Fig. 2. Kreuzung einer roten pelorischen (a) mit einer elfenbeinfarbigen normalen (b) Löwenmaulrasse. Der Bastard c zeigt Dominanz der normalen Form des einen Elters und der roten Farbe des andern (rot und blaßrot sind in dieser Figur nicht unterschieden, in natura ist der Bastard blaßrot). d bis f = die in der Nachkommenschaft des Bastardes auftretenden verschiedenen Kategorien (rot und blaßrot auch hier nicht unterschieden).

Es kommt auch vor, daß die Dominanz einer Eigenschaft je nach dem Alter verschieden ausgesprochen ist. Ein sehr auffälliger solcher Wechsel der Dominanz einer Färbung ist z. B. bei Schneckenkreuzungen gefunden worden.

Genau die gleichen Gesetze gelten entsprechend auch, wenn wir Rassen kreuzen, die sich in mehr als einem Merkmal unterscheiden, wenn wir also nicht bloß „Monohybriden", sondern Di-, Tri- und Polyhybriden erzeugen. Betrachten wir zur Orientierung hier wieder einen ganz einfachen Fall. Wir kreuzen eine rote pelorische Löwenmaulrasse (Fig. 2a) (mit vollkommen radiären etwa primelähnlichen Blüten) mit einer normalblütigen (zygomorphen) elfenbeinfarbigen (Fig. 2b). Der Bastard ist blaßrot und hat völlig normale Blütenform, nur die Oberlippe ist etwas kleiner als bei den homozygotisch normalen Sippen (Fig. 2c). Wir haben also hier einen Fall fast völliger Dominanz der normalen Blütenform über die pelorische, während hinsichtlich der Farbe der Bastard wieder ungefähr eine Mittelstellung einnimmt. Die durch Selbstbefruchtung eines solchen Bastards gewonnene F_2-Generation (Fig. 2d bis g) besteht aus 6 äußerlich verschiedenen Kategorien von Pflanzen, nämlich aus

roten normalen (3)
blaßroten normalen (6)
roten pelorischen (1)
blaßroten pelorischen (2)
elfenbeinfarbigen normalen (3)
elfenbeinfarbigen pelorischen (1)

Die Zahlenverhältnisse, in denen diese verschiedenen Kategorien auftreten, sind in () beigefügt. Wie auf Grund der Spaltungsgesetze diese Kategorien und diese Verhältniszahlen zustande kommen, leiten wir in ähnlicher Weise ab, wie in dem erst besprochenen Beispiel: Eine Sexualzelle oder, wie man jetzt meistens sagt, einen Gameten der normalen elfenbeinfarbigen Rasse bezeichnen wir mit fE, einen Gameten der roten pelorischen Rasse mit Fe. Dabei bedeute:

F Fähigkeit zur Bildung roter Blütenfarbe;

f Fehlen dieser Fähigkeit, d. h. der so bezeichnete Gamet überträgt das Merkmal elfenbeinfarbige Blüte;

E Fähigkeit zur Bildung normaler, d. h. zygomorpher Blüten;

e Fehlen dieser Fähigkeit, d. h. dieser Gamet überträgt das Merkmal pelorischer Blütenform.

Die aus der Vereinigung zweier Gameten Fe (rote Blütenfarbe pelorischer Blüten) entstandene eine P_1-Pflanze aus der roten pelorischen Rasse, bekommt also die „Erbformel" FFee.

Die aus der Vereinigung zweier Gameten fE (elfenbeinfarbige normale Blüte) entstandene andere P_1-Pflanze aus der elfenbeinfarbigen normalen Rasse hat dann die Formel ffEE.

Der Bastard hat entsprechend die Formel FfEe, da er ja durch die Vereinigung eines Gameten Fe und eines Gameten fE entstanden ist. Wenn dieser Bastard geschlechtsreif wird, bildet er nach der Mendelschen Theorie im ganzen viererlei verschiedene Gameten aus, nämlich:

FE, die rote Farbe und normale Form übertragen
Fe, „ „ „ „ pelorische „ „
fE, „ elfenbein „ „ normale „ „
fe, „ „ „ „ pelorische „ „

Diese viererlei verschiedenen Gameten werden ungefähr in gleicher Zahl gebildet, d. h. jede dieser vier Kategorien bildet etwa $^1/_4$ der sämtlichen Gameten, der männlichen sowohl wie der weiblichen.

Wenn wir einen solchen Bastard FfEe mit sich selbst, oder wenn wir mehrere solcher Bastarde gegenseitig miteinander befruchten, dann können sich die vier Kategorien von weiblichen Sexualzellen mit den vier Kategorien von männlichen Sexualzellen in 16 verschiedenen Kombinationen vereinigen, nämlich:

1. Eine ♀ Sexualzelle FE kann treffen eine ♂ Sexualzelle FE und gibt ein Individuum FFEE d. h. eine rote, normale Pflanze
2. „ „ „ FE „ „ „ „ „ Fe und gibt ein Individuum FFEe d. h. eine rote, normale Pflanze
3. „ „ „ FE „ „ „ „ „ fE und gibt ein Individuum FfEE d. h. eine blaßrote, normale Pflanze
4. „ „ „ FE „ „ „ „ „ fe und gibt ein Individuum FfEe d. h. eine blaßrote, normale Pflanze

5. Eine ♀ Sexualzelle Fe kann treffen eine ♂ Sexualzelle FE und gibt ein Individuum FFEe d. h. eine rote, normale Pflanze
6. „ „ „ Fe „ „ „ „ „ Fe und gibt ein Individuum FFee d. h. eine rote, pelorische Pflanze
7. „ „ „ Fe „ „ „ „ „ fE und gibt ein Individuum FfEe d. h. eine blaßrote, normale Pflanze
8. „ „ „ Fe „ „ „ „ „ fe und gibt ein Individuum Ffee d. h. eine blaßrote, pelorische Pflanze
9. „ „ „ fE „ „ „ „ „ FE und gibt ein Individuum FfEE d. h. eine blaßrote normale Pflanze
10. „ „ „ fE „ „ „ „ „ Fe und gibt ein Individuum FfEe d. h. eine blaßrote, normale Pflanze
11. „ „ „ fE „ „ „ „ „ fE und gibt ein Individuum ffEE d.h. eine elfenbeinfarbig, normale Pflanze
12. „ „ „ fE „ „ „ „ „ fe und gibt ein Individuum ffEe d.h. eine elfenbeinfarbig, normale Pflanze
13. „ „ „ fe „ „ „ „ „ FE und gibt ein Individuum FfEe d. h. eine blaßrote normale Pflanze
14. „ „ „ fe „ „ „ „ „ Fe und gibt ein Individuum Ffee d. h. eine blaßrote, pelorische Pflanze
15. „ „ „ fe „ „ „ „ „ fE und gibt ein Individuum ffEe d. h. eine elfenbeinfarbige, normale Pflanze
16. „ „ „ fe „ „ „ „ „ fe und gibt ein Individuum ffee d. h. eine elfenbeinfarbige, pelorische Pflanze

In Form des üblichen Schemas ist dieser Kreuzungsversuch auf Seite 858 dargestellt.

Ein Blick auf die Uebersicht zeigt, daß von den 16 möglichen Kombinationen

drei (1, 2, 5) Pflanzen mit roten normalen Blüten,

sechs (3, 4, 7, 9, 10, 13) Pflanzen mit blaßroten normalen Blüten,

eine (6) Pflanze mit roten pelorischen Blüten,

zwei (8, 14) Pflanzen mit blaßroten pelorischen Blüten,

drei (11, 12, 15) Pflanzen mit elfenbeinfarbigen normalen Blüten,

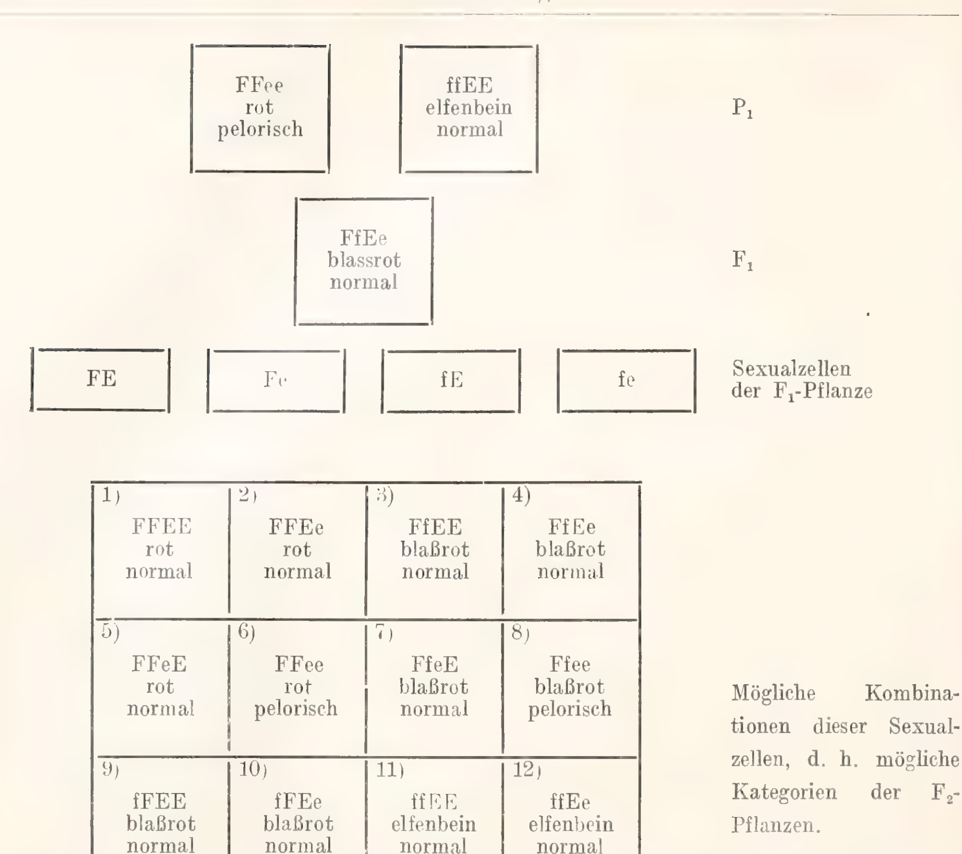
eine Pflanze mit elfenbeinfarbigen pelorischen Blüten ergeben müssen.

Wir werden demnach in F_2 dieser Kreuzung die 6 äußerlich verschiedenen Kategorien „rot normal“, „blaßrot normal“, „rot pelorisch“, „blaßrot pelorisch“, „elfenbein normal“ und „elfenbein pelorisch“ im Verhältnis 3:6:1:2:3:1 auffinden müssen. Die im Versuch gefundenen Zahlen stehen damit gut in Einklang, eine solche Kreuzung hat z. B. folgende F_2-Generation ergeben: rot normal 39 : blaßrot normal 94 : rot pelorisch 15 : blaßrot pelorisch 28 : elfenbein normal 45 : elfenbein pelorisch 13.

Auf Grund der Theorie ist ferner zu erwarten, daß je $^1/_3$ der normal blühenden Kategorien weiterhin normal blühende Deszendenz haben wird, nämlich alle Individuen aus EE-Kategorien (Nr. 1, 3, 9, 11), ferner werden wir erwarten müssen, daß je $^2/_3$, nämlich die aus den Ee-Kategorien (Nr. 2, 4, 5, 7, 10, 12, 13, 15), weiterhin aufmendeln müssen in $^1/_4$ normale und $^3/_4$ pelorische Pflanzen. Auch dieses theoretische Postulat wird durch den Versuch erfüllt. Tatsächlich erweist sich in allen derartigen Kreuzungen ein entsprechender Teil der normalen F_2-Pflanzen, der übrigens auch an der kleinen Oberlippe meist äußerlich kenntlich ist, als Ee, d. h. mendelt in normale und pelorische Individuen auf.

In Form eines Stammbaumes sieht dieser ganze Versuch so aus, wie es auf Seite 859 dargestellt ist.

Wir sehen also, daß die verschiedenen Merkmale, durch welche die beiden ursprünglich gekreuzten Rassen sich unterscheiden, ganz unabhängig voneinander sich auf die Gameten des Bastardes verteilen, oder, wie man zu sagen pflegt, ganz unabhängig voneinander mendeln. Dieses Gesetz der Selbständigkeit der Merkmale ist neben der Spaltungsregel die wichtigste Grundlage der experimentellen Vererbungslehre. Auch dieses Gesetz hat



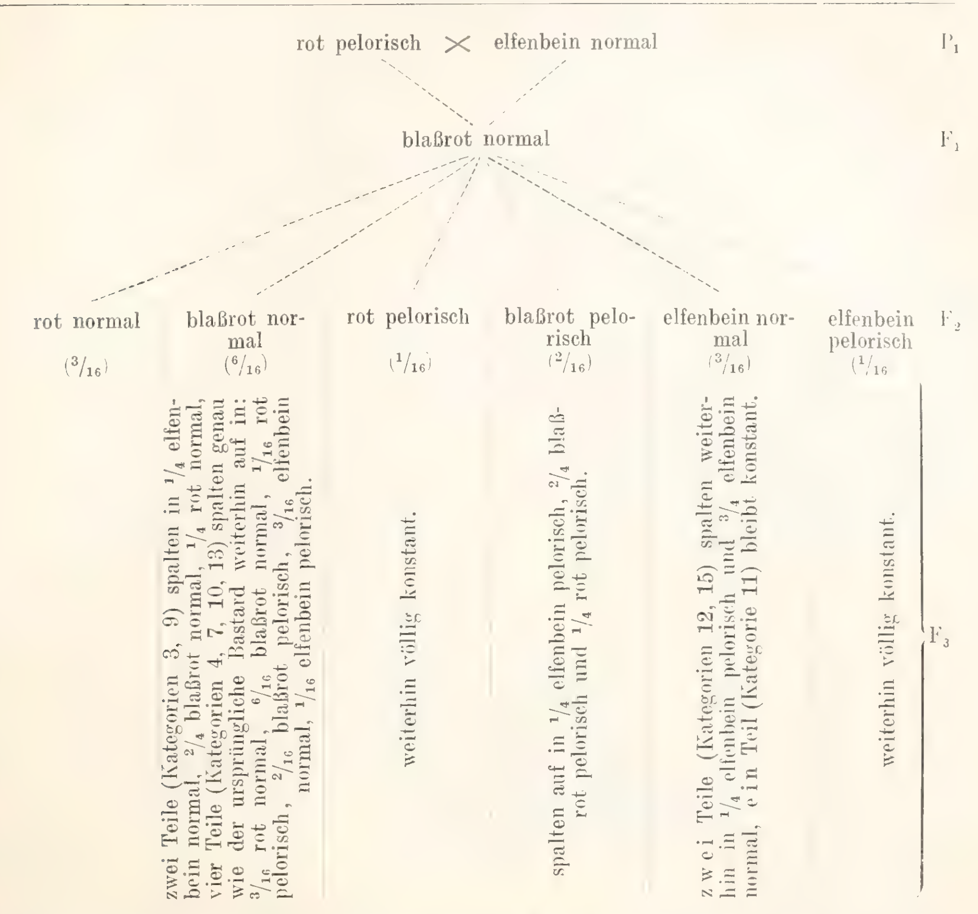
1) FFEE rot normal	2) FFEe rot normal	3) FfEE blaßrot normal	4) FfEe blaßrot normal
5) FFeE rot normal	6) FFee rot pelorisch	7) FfeE blaßrot normal	8) Ffee blaßrot pelorisch
9) fFEE blaßrot normal	10) fFEe blaßrot normal	11) ffEE elfenbein normal	12) ffEe elfenbein normal
13) fFeE blaßrot normal	14) fFee blaßrot pelorisch	15) ffeE elfenbein normal	16) ffee elfenbein pelorisch

schon Mendel gefunden und mit aller Schärfe präzisiert.

Analoge Beispiele sind bei Pflanzen und Tieren heute bereits in sehr großer Zahl untersucht. Ein sehr schöner, den eben genannten ganz entsprechender Schulfall liegt vor bei der Kreuzung einer konstanten glatthaarigen schwarzen Meerschweinchenrasse mit einer anderen rauhhaarigen weißen (vgl. Fig. 3). F_1 ist dann rauhhaarig und schwarz und in F_2 treten vier Typen auf, schwarze rauhhaarige, weiße rauhhaarige, schwarze glatthaarige und weiße glatthaarige.

Man kann nun auch Rassen kreuzen, die in noch mehr Merkmalen verschieden sind. Wir können etwa kreuzen ein elfenbeinfarbiges, normales, hochwüchsiges Löwenmaul mit einem roten, pelorischen, niedrigwüchsigen. F_1 ist dann rot normal und hoch. Es dominiert auch hoher Wuchs ziemlich weitgehend über niedrigem Wuchs. Bezeichnen wir eine Sexualzelle, welche das Merkmal hoher Wuchs überträgt, mit X und eine, welche das Merkmal niedriger Wuchs überträgt, mit x, und behalten wir für Form und Farbe die früheren Bezeichnungen bei, so ist die Formel der elfenbeinfarbigen normalen hohen Rasse ffEExx und die der roten pelorischen niedrigen FFeexx. Der Bastard ist dann FfEeXx und bildet achterlei verschiedene Gameten aus, nämlich: FEX, FEx, FeX, Fex, fEX, fEx, feX, fex, zwischen denen 64 verschiedene Kombinationen möglich sind.

Aeußerlich verschieden werden natürlich auch hier nicht alle 64 möglichen Kombinationen sein, sondern wir werden nur achterlei verschieden aussehende Typen in F_2 finden (wenn wir die hier übrigens ziemlich



gut erkennbaren Unterschiede zwischen den Homo- und den Heterozygoten außer acht lassen). Diese achterlei Typen werden sein: 1. rot normal hoch (27), 2. rot normal niedrig (9), 3. rot pelorisch hoch (9), 4. rot pelorisch niedrig (9), 5. elfenbein normal hoch (3), 6. elfenbein normal niedrig (3), 7. elfenbein pelorisch hoch (3), 8. elfenbein pelorisch

Zahl der Erbeinheiten, in Bezug auf welche die Eltern (P_1) heterozygotisch sind	Zahl der verschiedenen Arten von Gameten, welche in F_1 gebildet werden	Zahl der möglichen Kombinationen der Gameten = Zahl der innerlich verschiedenen Kategorien von F_2-Individuen	Maximale Zahl der äußerlich verschiedenen Kategorien von F_2-Individuen, wenn überall völlige Dominanz vorliegt	Die äußerlich verschiedenen Kategorien von F_2-Individuen sind, wenn überall völlige Dominanz vorliegt, vertreten durch Individuenzahlen, welche zueinander in den folgenden Verhältnissen stehen. Hängt eine äußerlich sichtbare Eigenschaft von mehreren heterozygotisch vorkommenden Erbeinheiten ab, dann treten hier abweichende, allerdings aus den nachstehend genannten ableitbare Zahlenreihen auf.
1	2^1 = **2**	$(2^1)^2$ = **4**	2^1 = **2**	3 : 1 (1, 1)
2	2^2 = **4**	$(2^2)^2$ = **16**	2^2 = **4**	9 : 3 : 3 : 1 (1, 2, 1)
3	2^3 = **8**	$(2^3)^2$ = **64**	2^3 = **8**	27 : 9 : 9 : 9 : 3 : 3 : 3 : 1 (1, 3, 3, 1)
4	2^4 = **16**	$(2^4)^2$ = **256**	2^4 = **16**	81:27:27:27:27:9:9:9:9:9:9:3:3:3:3:1 (1, 4, 6, 4, 1)
n	2^n	$(2^n)^2$	2^n	$3^n : 3^{n-1} : 3^{n-1} : 3^{n-1} \ldots 3^{n-2} : 3^{n-2} : 3^{n-2} \ldots$ usw. (1 ... usw. = Koeffizienten des Binoms $(a+a)^n$ .... 1)

niedrig (1). Das Zahlenverhältnis, in dem in F_2 diese verschiedenen Typen auftreten, ist überall in Klammern beigefügt. Jede dieser Typen kann, wie eine einfache Ueberlegung zeigt, homozygozisch gezüchtet werden, es ist also leicht möglich — und in zahllosen Fällen durchgeführt — durch eine solche Rassenkreuzung eine ganze Reihe neuer Rassen zu erhalten, die freilich im Grunde genommen alle nur Neukombinationen der sich unabhängig voneinander vererbenden Unterschiede zwischen den Ausgangsrassen sind.

Daß es sich nur um Neukombinationen, nicht um etwas völlig Neues handelt, vermindert die ja wohl ohne weiteres einleuchtende ungeheuer große Wichtigkeit dieser Erkenntnis für die Praxis der Tier- und Pflanzenzüchtung nicht im mindesten. Wir werden nachher noch hören, daß im Grunde genommen die übergroße Mehrzahl aller Unterschiede zwischen den Rassen

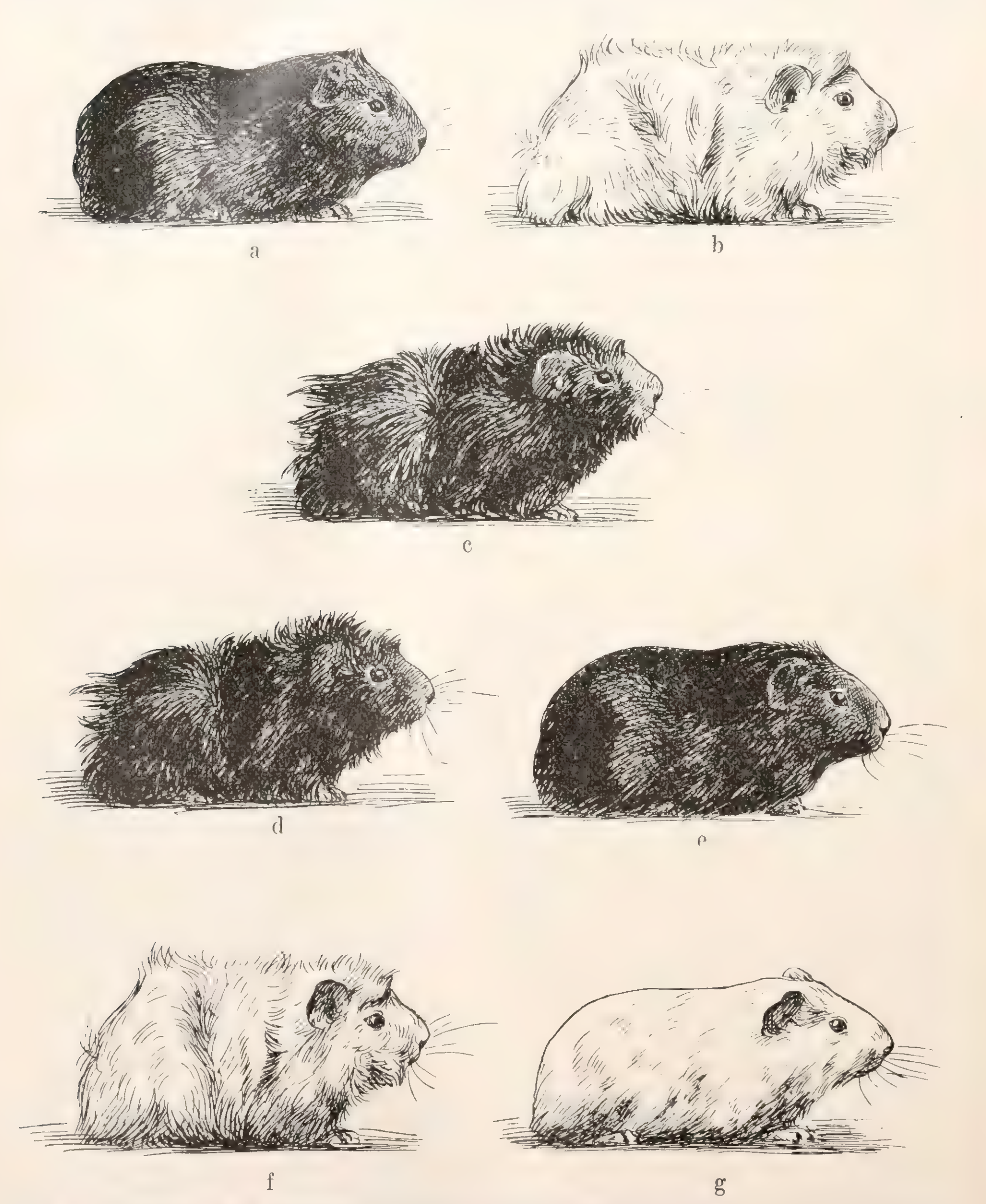


Fig. 3. Kreuzung einer schwarzen glatthaarigen Meerschweinchenrasse a mit einer weißen rauhhaarigen b. c = der Bastard, d bis g = die in F_2 auftretenden Typen.

einer Spezies überhaupt nur auf den verschiedenen Kombinationen einer relativ kleinen Zahl von selbständig „als Einheiten“ mendelnden Verschiedenheiten beruht.

Kreuzen wir Rassen, die sich in noch mehr Merkmalen unterscheiden, dann gelten diese selben Gesetzmäßigkeiten weiter. Was für Zahlenverhältnisse dabei auftreten, und welche allgemeine Formel für n-Merkmale leicht aufgestellt werden kann, zeigt die die auf Seite 859 unten stehende Tabelle.

Mit der zunehmenden Zahl von selbständig sich vererbenden Unterschieden zwischen zwei gekreuzten Rassen wird demnach die Zusammensetzung der F_2-Generation rasch ganz ungemein kompliziert. Unterscheiden sich z. B. zwei Rassen nur in 7 selbständigen Merkmalen, so treten in F_2 schon $2^7 = 128$ äußerlich verschiedene Kategorien von Individuen auf.

Man hat in den letzten Jahren mit den allerverschiedensten Tieren und Pflanzen Kreuzungen in großem Maßstabe vorgenommen und es hat sich dabei gezeigt, daß die vorstehend dargelegten Mendelschen Spaltungsgesetze eine ganz universale Geltung haben.

Die gleichen Regeln gelten für die Vererbungsweise bei Rassenkreuzungen bei den allerverschiedensten Pflanzen und Tieren, so bei Mäusen, Hunden, Katzen, Schafen, Axolotln, Kanarienvögeln, Schmetterlingen ebensowohl wie bei Getreidearten, Eichen, Baumwolle und zahllosen anderen höheren Pflanzen. Nur mit niederen Pflanzen sind noch keinerlei entsprechende Versuche angestellt worden.

Auch zahlreiche Kreuzungsergebnisse, die zunächst sich durchaus nicht den Spaltungsgesetzen zu fügen schienen, sind bei näherer Untersuchung doch als völlig mit ihnen in Einklang stehend erkannt worden. Freilich sind dabei sehr vielerlei Komplikationen der Spaltungserscheinungen bekannt geworden, welche die genaue Analyse einer Kreuzung oft sehr erschweren können. Die wichtigste von diesen Komplikationen ist die, daß eine scheinbar einheitliche Eigenschaft immer abhängt von mehreren selbständig mendelnden Grundeigenschaften, die man als Faktoren, Erbeinheiten, Allelomorphs oder mit einem internationalen Ausdruck als Gene bezeichnet. Es kann z. B. die braune Farbe in den Federn eines Vogels dadurch zustande kommen, daß ein farbloses Chromogen durch die Einwirkung eines Enzyms erst die braune Farbe erhält. „Fähigkeit zur Bildung des Enzyms“ und „Fähigkeit zur Bildung des Chromogens“ können aber selbständig sich vererbende und jede für sich unabhängig mendelnde Eigenschaften sein. Es kann z. B. einer weißen Hühnerrasse die Fähigkeit zur Enzymbildung fehlen, während die Fähigkeit zur Chromogenbildung vorhanden ist. Einer anderen weißen Rasse kann die Fähigkeit zur Chromogenbildung fehlen bei Vorhandensein der Fähigkeit zur Enzymbildung. Kreuzt man zwei derartige aus verschiedenen Ursachen weiße Rassen, so werden Bastarde erstehen, die von dem einen Elter her die Fähigkeit zur Enzymbildung vom anderen die Fähigkeit zur Chromogenbildung ererbt haben, und die demnach durch „Bastardatavismus“ gefärbtes Gefieder haben und die weiterhin bei Paarung untereinander aufspalten müssen in 9 Teile gefärbte und 7 Teile weiße Nachkommen.

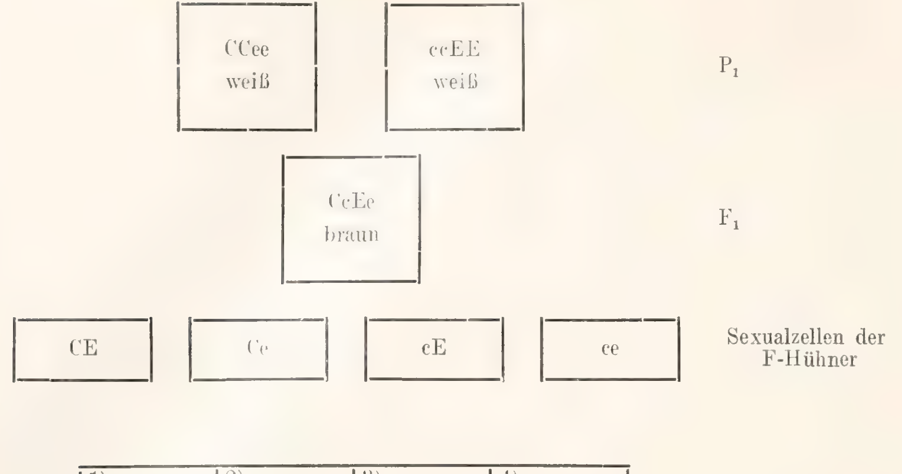
Drücken wir auch diesen Versuch in der vorhin verwendeten Formelbezeichnung aus und bezeichnen etwa mit C die Fähigkeit zur Bildung des Chromogens, mit E die zur Bildung des Enzyms und mit den entsprechenden kleinen Buchstaben das Nichtvorhandensein der betreffenden Fähigkeit, dann kann er schematisch wie auf Seite 862 dargestellt werden.

In diesem Beispiele äußert sich also das Gen E nur, wenn gleichzeitig in dem betreffenden Organismus noch außerdem auch das Gen C enthalten ist und bleibt wirkungslos und äußerlich nicht erkennbar in Individuen, welche C nicht enthalten. Man sagt in solchen Fällen, wo ein Gen quasi unsichtbar in einem Individuum enthalten ist und von ihm vererbt wird, es sei kryptomer vorhanden.

Die intensive Arbeit der letzten Jahre zeigt uns immer mehr, daß im Grunde genommen jede äußerlich erkennbare erbliche Eigenschaft eines Organismus abhängt nicht bloß von einer, sondern von einer ganzen Reihe von selbständig mendelnden Erbeinheiten. In manchen Fällen wirken alle diese Erbeinheiten oder Gene ganz unabhängig voneinander, in anderen Fällen äußert sich häufig eine Erbeinheit nur dann, wenn außer ihr noch bestimmte andere, oft eine ganz geschlossene „Faktorenkette“ in einem Organismus enthalten sind (so in dem eben erwähnten Hühnerbeispiele).

Für das Löwenmaul ist so heute schon bekannt, daß die satt rote Farbe, die wohl die Farbe der hauptsächlichen Stammart darstellt, nur zustande kommt, wenn gleichzeitig eine geschlossene Kette von fünf vollständigen Genen vorhanden ist.

Weiterhin stellt sich bei genauer Analyse jetzt aber auch schon immer deutlicher heraus, daß jeweils eine von diesen durch die Versuche erkennbaren Erbeinheiten sich nicht bloß in einer äußerlich sichtbaren Eigenschaft äußert, sondern in mehreren, z. B. beeinflußt beim Löwenmaul eine ge-



1) CCEE braun	2) CCEe braun	3) CcEE braun	4) CcEe braun
5) CCeE braun	6) CCee weiß	7) CceE braun	8) Ccee weiß
9) cCEE braun	10) cCEe braun	11) ccEE weiß	12) ccEe weiß
13) cCeE braun	14) cCee weiß	15) cceE weiß	16) ccee weiß

Mögliche Kombinationen dieser Sexualzellen, d. h. mögliche Kategorien von F_2-Hühnern.

9 Kategorien sind gefärbt, 7 weiß.

wisse Erbeinheit die Blütenfarbe, die Blattfarbe ferner aber auch den Wuchstypus und den anatomischen Bau der Blattepidermis, oder bei der Maus beeinflußt die gleiche Erbeinheit die Verteilung der Farbe im einzelnen Haar (Agoutizeichnung) und die Ausbildung eines weiß behaarten Bauches. Bei den Levkoyen ist ein Fall bekannt, daß eine Erbeinheit als Glied in einer „Faktorenkette" für die Ausbildung der Blütenfarbe erforderlich ist und außerdem aber auch sich in der Umbildung von Haaren äußert. Solche Beispiele ließen sich leicht in großer Zahl anführen.

Das alles drängt uns zu der Vorstellung, daß die mit den Sinnen wahrnehmbaren äußeren Eigenschaften der Pflanzen und Tiere und die durch Bastardanalyse erkennbaren Erbeinheiten oder Gene ganz prinzipiell verschiedene Dinge sind, zwischen denen nur etwa analoge Beziehungen bestehen wie zwischen den äußeren Eigenschaften, Geruch, Geschmack, Farbe usw. eines chemischen Körpers und seiner chemischen Formel.

Wir können durch sorgfältige Analyse einer größeren Anzahl von Kreuzungen für eine gegebene Pflanzen- oder Tierspezies eine lange Reihe von Erbeinheiten oder Genen präzisieren und können auf Grund der so gewonnenen Erkenntnis dann leicht die Resultate auch der kompliziertesten Kreuzungen verstehen, und können deren Resultate vorhersagen, genau so wie ein Chemiker, der die chemische Formel gewisser Stoffe kennt, vorhersagen kann, welche Eigenschaften die aus der Vereinigung und teilweisen Wiederzerlegung dieser Körper

hervorgehenden neuen chemischen Stoffe haben. Was aber diese Erbeinheiten im Grunde genommen sind, entzieht sich heute noch völlig unserer Kenntnis.

Der wohl am weitesten analysierte Organismus ist das Gartenlöwenmaul Antirrhinum majus, für das etwa 20 Erbeinheiten bekannt sind, welche die Blütenfarbe beeinflussen. Alle die zahllosen (hunderte!) im Handel befindlichen Farbenrassen dieser Pflanze beruhen nur auf verschiedenen Kombinationen einer verhältnismäßig kleinen Zahl von Erbeinheiten. Unter den Tieren ist wohl bei der Hausmaus, ferner bei den Ratten und den Kaninchen die Analyse am weitesten gediehen.

Man ist nach dem Vorgang von Correns, Bateson, Shull und anderen in den letzten Jahren stillschweigend übereingekommen, die Erbeinheiten so zu formulieren, daß, so wie wir es hier in den bisherigen Beispielen schon immer durchgeführt haben, zwei Merkmale einander paarweise — Merkmalspaar — gegenübergestellt werden, in denen das Vorhandensein (Presence) dem Fehlen (Absence) einer bestimmten Fähigkeit angenommen wird (Presence-Absence-Theorie) und es hat sich auch eine ganz bestimmte Formelschreibweise eingebürgert, indem man immer das Vorhandensein einer Erbeinheit mit dem großen, das Fehlen mit dem kleinen Buchstaben bezeichnet. Ob die Presence-Absence-Theorie irgendwie geeignet ist, zu einem Verständnis des Wesens der Erbeinheiten zu führen, ist sehr zweifelhaft. Die Darstellung auch sehr komplizierter Spaltungserscheinungen wird aber jedenfalls durch die auf dieser Theorie basierende Formelbezeichnung der Erbeinheiten ganz ungemein erleichtert.

Kreuzt man Rassen, die in sehr zahlreichen Erbeinheiten verschieden sind, dann erhält man in F_2 Aufspaltungen von einer ungeheuren Kompliziertheit, ist ein Individuum heterozygotisch nur in 10 Erbeinheiten, so werden $2^{10} = 1024$ verschiedene Gameten gebildet, die $(2^{10})^2$, d. h. über eine Million verschiedene Kombinationen ermöglichen. Aus der Kreuzung von zwei in 10 Erbeinheiten verschiedenen Rassen können 1024 verschiedene homozygotische Rassen hervorgehen.

Analysiert in allen Einzelheiten ist bisher noch keine so komplizierte Spaltung; bei den kompliziertesten bisher völlig klargelegten Aufspaltungen haben höchstens 6 bis 7 Erbeinheiten heterozygotisch vorgelegen. Es ist deshalb auch heute noch nicht möglich, zu entscheiden, wie viele Erbeinheiten in einer Kreuzung überhaupt gleichzeitig selbständig mendeln können, eine Vorfrage, die von der größten Wichtigkeit ist für die Frage nach der cytologischen Basis der Spaltungserscheinungen, einem heute noch gänzlich unlösbaren Probleme.

Die Verteilung der verschiedenen Erbeinheiten auf die Gameten erfolgt nicht immer gleichmäßig, es sind Kreuzungsergebnisse bekannt, die dafür sprechen, daß bei der Gametenbildung nicht alle möglichen Gametenkategorien, wie es sonst die Regel ist, in gleicher Zahl gebildet werden, sondern daß manche Gametenkategorien in sehr großer, andere in sehr kleiner Zahl produziert werden. Vielleicht beruht dies darauf, daß bei der Gametenbildung einzelne Erbeinheiten sich anziehen, andere sich abstoßen. Man bezeichnet diese Erscheinungen, die noch wenig geklärt sind, als Faktorenabstoßung (Spurious allelomorphism) und Faktorenkoppelung (Gametic coupling).

Man kennt heute solche Fälle aus dem Tier- und Pflanzenreich schon in großer Zahl. Wie gewöhnlich sind auch hier die pflanzlichen Beispiele bei weitem besser untersucht, entsprechend der viel größeren Leichtigkeit, mit Pflanzen Vererbungsversuche rationell durchzuführen als mit Tieren. Es sei deshalb auch wiederum ein pflanzliches Schulbeispiel genannt: Bei Erbsen gibt es eine Rasse, die als „akazienblätterig“ bezeichnet wird, mit Blättern ohne Ranken an der Blattspitze. Bei der Kreuzung einer rankenlosen mit einer rankentragenden Rasse ist F_1 rankentragend und in F_2 erfolgt eine Spaltung in $^3/_4$ rankentragend: $^1/_4$ rankenlos. Wir wollen weiterhin die Fähigkeit zur Rankenbildung mit R, ihr Fehlen mit r bezeichnen, die rankenlose Sippe hat demnach die Formel rr. Ferner unterscheiden sich die Erbsenrassen auch in der Form ihrer Keimblätter, die glatt (Stärke als Reservestoff), oder runzelig (Zucker als Reservestoff) sein können. Die Bastarde zwischen einer runzeligen und einer glatten Rasse haben glatte Keimblätter und in F_2 erfolgt eine regelrechte Spaltung. Wir wollen Fähigkeit zur Bildung glatter Keimblätter mit G, ihr Fehlen mit g bezeichnen, eine Rasse mit runzeligen Keimblättern ist dann gg, eine mit glatten Keimblättern GG. Kreuzt man nun eine runzelige rankenlose Erbsenrasse ggRR mit einer glatten rankentragenden GGRR, so hat der F_1-Bastard GgRr glatte Keimblätter und trägt Ranken. Für F_2 sollte man nach der Regel für die Dihybriden (S. 856) erwarten, daß eine Aufspaltung erfolgt in

9 Teile glatt rankentragend,
3 Teile runzelig rankentragend,

3 Teile glatt rankenlos,
1 Teil runzelig rankenlos,

das ist aber nicht der Fall, sondern in einem entsprechenden Versuche (Vilmorin und Bateson) wurden gefunden

319 Pflanzen glatt rankenlos,
3 ,, runzelig rankentragend,
3 ,, glatt rankenlos,
123 ,, runzelig rankenlos.

Mithin ein gänzlich abweichendes Zahlenverhältnis.

Zu Zahlen, die den im Versuche gefundenen ziemlich genau entsprechen, kommt man, wenn man die Annahme macht, daß ein solcher Bastard GgRr seine viererlei möglichen Gameten nicht in gleicher Häufigkeit produziert, also nicht 1GR:1Gr:1gR:1gr, sondern im Verhältnis 63GR:1GR:1gR:63gr. Berechnet man die zwischen diesen 128 Gameten möglichen Kombinationen, so ergibt sich, daß unter den $128^2 = 16384$ möglichen Kombinationen:

12161 glatt rankentragend,
127 runzelig rankentragend,
127 glatt rankenlos,
3969 runzelig rankenlos

sein müssen, und die in dem eben genannten Versuche gefundenen Zahlen stehen tatsächlich zueinander in einem sehr ähnlichen Verhältnis. Genau das Verhältnis 12161:127:127:3969 wäre 333 (gefunden 319): 3,4 (gefunden 3): 3,4 (gefunden 4): 109 (gefunden 123).

In entsprechender Weise hat sich zeigen lassen, daß auch in vielen anderen Fällen die in F_2 gefundenen Zahlenverhältnisse nur zu verstehen sind, wenn man annimmt, daß die verschiedenen möglichen Gameten in ungleicher Häufigkeit gebildet werden. Statt wie hier das Verhältnis 63:1:1:63 sind besonders häufig die Verhältnisse 7:1:1:7, 15:1:1:15, 127:1:1:127 für die Gameten gefunden worden.

Man kann einen Bastard GgRr nicht bloß wie in dem eben besprochenen Beispiel erzielen durch Kreuzung einer Pflanze von der Formel GGRR (glatt rankentragend) mit einer anderen von der Formel ggrr (runzelig rankenlos), sondern auch durch die Kreuzung GGrr × ggRR (d. h. glatt rankenlos × runzelig rankentragend). Es hat sich nun vielfach gezeigt, daß ein nach dem ersten Schema entstandener Bastard die Gameten im Zahlenverhältnis 63GR:1Gr:1gR:63gr bildet, daß dagegen der aus der reziproken Kreuzung entstandene seine Gameten im Verhältnis 1GR:63Gr:63gr:1gr hervorbringt und dementsprechend gänzlich andere Zahlenverhältnisse in F_2 aufweist. (Speziell für diese Erbsenkreuzung ist die reziproke Kreuzung noch nicht untersucht, aber diese Gesetzmäßigkeit gilt in vielen anderen Fällen.)

Eine allgemeine Gesetzmäßigkeit liegt aber nicht vor, es sind auch Fälle bekannt, wo bei der einen Kreuzung eine derartige Koppelung besteht, wo die andere Kreuzung aber völlig normal mendelnde Bastarde ergibt.

Komplikationen, welche zunächst nicht den Spaltungsgesetzen sich zu fügen scheinen, gibt es außer den schon genannten auch sonst noch in großer Zahl. Zu sehr eigentümlichen Konsequenzen kann es z. B. führen, wenn von den in F_2 heraus mendelnden Neukombinationen eine oder einige nicht lebensfähig sind, auf irgendeinem mehr oder weniger frühen Stadium der Embryogenese absterben. Ein solcher Fall liegt z. B. vor bei den Mäusen, wo es sich gezeigt hat, daß eine bestimmte Rasse von gelben Tieren nie homozygotisch vorkommt. Es hängt dies damit zusammen, daß homozygotisch gelbe Tiere gar nicht existieren können, sei es, weil die betreffende Gametenkombination aus irgendeinem Grunde nicht zustande kommt, sei es, weil diese homozygotischen Tiere als jüngste Embryonen sterben. Auch bei Pflanzen sind mehrere analoge Fälle seit langem bekannt.

Darüber, daß zwei für gewöhnlich selbständig mendelnde Erbeinheiten sich nicht bloß anziehen oder abstoßen, sondern gegenseitig verändern, quasi „verunreinigen" — Unreinheit der Gameten — gibt es zwar verschiedene Angaben, aber sicher festgestellt ist bisher keine von ihnen.

Wohl in der Mehrzahl der so gedeuteten Fälle liegt die Sache so, daß die gekreuzten Rassen sich in mehr Erbeinheiten unterscheiden, als die Beobachter wußten. Das ist am besten an einem beim Hafer (Avena sativa) gefundenen Beispiele zu zeigen: Es gibt dort u. a. Rassen mit schwarzen, andere mit grauen und andere mit weißen Deckspelzen. Die schwarze Farbe und die graue Farbe mendeln völlig unabhängig, und eine schwarze Pflanze kann gleichzeitig auch noch grau gefärbt sein, ohne daß man ihr das ansehen kann, weil die dunkle schwarze Farbe die graue völlig verdeckt. Bezeichnen wir nun in der uns jetzt schon vertrauten Weise Fähigkeit zur Bildung der schwarzen Farbe mit S, ihr Fehlen mit s und Fähigkeit zur Bildung grauer Farbe mit G, ihr Fehlen mit g, so wäre eine quasi „doppelt" gefärbte (schwarz + grau) Rasse SSGG, eine weiße ssgg und der Bastard ist dann SsGg, er muß als Dihybrid nicht bloß in schwarze und weiße, sondern in schwarze, graue und weiße F_2-Pflanzen aufspalten, die, wie eine

Ausführung der Gametenkombinationen ergibt, im Verhältnis von 12 schwarz:3 grau:1 weiß stehen (die in den Versuchen gefundenen Zahlen stimmen völlig!). Kennt man die Sachlage nicht, und vor allem hat man nur wenige F_2-Individuen beobachtet, so wird man leicht geneigt sein, an eine „unreine" Spaltung zu denken und die grauen Individuen so deuten, daß ein Teil der weißen herausmendelnden F_2-Individuen etwas von der schwarzen Färbung „abbekommen" hätten.

Daß alle heute beschriebenen Fälle von „unreiner" Spaltung sich genau in dieser Weise erklären lassen, soll natürlich nicht gesagt sein, aber das Beispiel zeigt, wie vorsichtig man mit dem Urteil, es läge eine „unreine" Spaltung vor, sein muß. Alle diese Fälle, zu denen als interessantester ein von Haecker bei Axolotln gefundener gehört, verdienen eine eingehende Untersuchung mit großem Material.

Mannigfache Komplikationen der Spaltungserscheinungen werden ferner auch durch das Geschlecht hervorgerufen vor allem durch eine Faktorenabstoßung zwischen einem geschlechtsbestimmenden, wohl auch mendelnden Gen und anderen Genen, z. B. bei Hühnern einem Gen, das eine ganz bestimmte Federnzeichnung bedingt.

In größerer Zahl sind Fälle von Koppelung zwischen einem geschlechtsbestimmenden Gen und einem Gen der Färbung bei Schmetterlingen (Abraxas und Colias z. B.) bekannt.

Außer durch Faktorenkoppelung erschwert das Geschlecht die Analyse von Kreuzungen auch noch in anderer Weise. So ist zunächst öfters die „Dominanz" in den beiden Geschlechtern ungleich: Kreuzt man eine in beiden Geschlechtern hörnertragende Schafrasse (Dorset-Schaf) mit einer in beiden Geschlechtern hornlosen Rasse (Suffolk-Schafe), so besteht F_1 aus gehörnten Männchen und hornlosen Weibchen. Behörnung „dominiert" im männlichen Geschlecht, ist im weiblichen „rezessiv". Dementsprechend besteht eine durch die Paarung solcher Bastarde untereinander erzeugte F_2-Generation aus 3 Teilen gehörnten: 1 Teil hornlosen Männchen und aus 3 Teilen hornlosen: 1 Teil gehörnten Weibchen. Auch beim Menschen kommen ähnliche Fälle von ungleicher Dominanz in den beiden Geschlechtern vor. Die Farbenblindheit oder doch wenigstens eine häufig vorkommende Kategorie von Farbenblindheit beruht auf dem Fehlen eines bestimmten Genes. Die aus der Ehe eines homozygotisch normaläugigen mit einem homozygotisch farbenblinden Elter hervorgehenden heterozygotischen Kinder sind, soweit sie männlich sind, farbenblind, soweit sie weiblich sind, normaläugig. Es dominiert danach Farbenblindheit im männlichen Geschlecht, ist im weiblichen dagegen rezessiv. Es ist natürlich beim Menschen nicht möglich, derartige Gesetzmäßigkeiten durch Experimente zu finden, sondern nur durch das Studium von Stammbäumen.

In allen den bisher besprochenen Beispielen ist es durchaus einerlei, ob in einer Kreuzung die eine Rasse den Vater, die andere die Mutter liefert, oder ob man die reziproke Kreuzung ausführt. Mit anderen Worten, die Vererbung durch die männlichen Geschlechtszellen ist genau die gleiche wie die durch die weiblichen. Von dieser Regel kennen wir nur einige ganz wenige und noch dazu noch nicht völlig klargelegte Ausnahmen, so bei der Vererbung der Blütenfüllung der Levkoyen.

Wenn auch heute noch sehr viele Resultate von Bastardierungsversuchen zwischen einander nahestehenden Rassen noch nicht völlig analysiert sind, so kann man doch wohl schon mit großer Sicherheit aussprechen, daß ganz allgemein für Rassen- und Varietätsbastarde die Mendelschen Spaltungsgesetze im wesentlichen die Vererbung beherrschen.

Es gibt aber auch Rassenunterschiede, die nach anderen Gesetzmäßigkeiten vererbt werden. So kennen wir bestimmte Kategorien von Buntblätterigkeit von Pflanzen, die überhaupt nur durch die Mutter vererbt werden ohne jeglichen Einfluß des Vaters und die sicher nicht mendeln. Ferner gibt es bei Pflanzen eigentümliche weißblätterige Sippen, die gekreuzt mit grünen Sippen Bastarde geben, welche vegetativ schon in grüne und weiße Mosaikstücke aufspalten, deren jedes dann weiterhin eine konstante vegetative und sexuelle Deszendenz hat. Mit den früher genannten Mosaikbastarden, die weiterhin regelrecht aufmendeln, haben diese nicht mendelnden, vegetativ aufspaltenden Bastarde selbstverständlich nur eine oberflächliche Aehnlichkeit. Daß auch bei mendelnden Bastarden gelegentlich ein analoges vegetatives Aufspalten vorkomme, wird zwar in der Literatur oft erwähnt, es ist aber noch kein sicherer Fall bekannt.

Unterschiede zwischen einander nahestehenden Sippen, die wie die beiden ebengenannten bei der Bastardierung nicht mendeln, scheinen aber gegenüber den mendelnden nur eine sehr untergeordnete Rolle zu spielen.

Diese Meinung stimmt freilch schlecht zu der besonders in der älteren Literatur immer wiederkehrenden Angabe, daß Bastarde zwischen nahestehenden Rassen sehr häufig eine ungefähr intermediäre Beschaffenheit zeigen und diese konstant,

ohne Spaltung vererben. Diese Angaben sind mit der größten Skepsis zu prüfen. Wenn geringe äußerliche Unterschiede auf sehr zahlreichen verschiedenen Erbeinheiten beruhen — und das kommt sehr oft vor! — ist es nur möglich, eine Spaltung zu erkennen, wenn man mit so großen Individuenzahlen arbeitet, wie sie in älteren Versuchen besonders mit Tieren nie untersucht worden sind. Das sei an einem Beispiel dargelegt: Die Bildung einer intermediären sofort konstanten Bastardrasse soll u. a. erfolgen bei der Kreuzung von langohrigen und kurzohrigen Kaninchen. Kreuzt man Tiere von etwa 220 mm Ohrlänge mit anderen von 110 mm Ohrlänge (beide aus konstanten reinen Zuchten), dann bekommt man Bastarde mit etwa 160 mm Ohrlänge und die weitere Nachkommenschaft dieser Bastarde, also F_2, F_3 usw., weist dieselbe intermediäre Ohrlänge auf (Fig. 4).

Nun hat Nilsson-Ehle gefunden, daß unter Umständen eine scheinbar einheitliche Eigenschaft, in seinem Falle z. B. rote Kornfarbe des Weizens hervorgerufen werden kann durch mehrere selbständig mendelnde Erbeinheiten, von denen aber im Gegensatz zu dem vorhin besprochenen Fall der beiden weißen Hühnerrassen jede für sich allein schon genügt, um rote Farbe hervorzurufen. Die Wirkung dieser Gene summiert sich. Heißen wir etwa die drei von Nilsson-Ehle gefundenen Erbeinheiten der roten Farbe beim Weizen R, S und T, so ist eine Pflanze von der Formel RRssll, die also nur eine von diesen Erbeinheiten enthält, blaß rot, eine, die zwei davon enthält (RRssTT z. B.), ist dunkler rot usw. Diese Erscheinung ist nach allem, was wir wissen, gar nicht selten.

Nimmt man dementsprechend an, daß die Ohrlänge der Kaninchen beeinflußt werde durch mehrere, etwa drei, unabhängig mendelnde Gene, die sich in ihrer Wirkung summieren. Die Gene sollen A, B, C heißen. Ein Kaninchen mit aabbcc in der Formel sei ein kurzohriges Tier mit 100 mm Ohrlänge. Jeder der drei Faktoren mache homozygotisch die Ohren um 40 mm länger. Ein Kaninchen mit der Formel Aabbcc habe also 120 mm Ohrlänge, eines mit AAbbcc habe 140 mm Ohrlänge usw und ein in allen drei Genen homozygotisches Kaninchen von der Formel AABBCC habe die Ohrlänge 220 mm. Kreuzt man ein Tier von der Formel AABBCC (220 mm Ohrlänge) mit einem anderen von der Formel aabbcc (100 mm Ohrlänge), so bekommt man in F_1 Tiere mit der Formel AaBbCc und 160 mm Ohrlänge. Paart man diese F_1-Tiere, die achterlei verschiedene Gameten, ABC, ABc, AbC, Abc, aBC, aBc, abC, abc produzieren, untereinander, so ergibt sich eine F_2-Generation, die aus 64 Kategorien besteht, und von diesen 64 Kategorien werden haben, wie eine einfache Ueberlegung zeigt:

1	die Ohrlänge	220 mm
6	,, ,,	200 ,,
15	,, ,,	180 ,,
20	,, ,,	160 ,,
15	,, ,,	140 ,,
6	,, ,,	120 ,,
1	,, ,,	100 ,,

Von 64 F_2-Tieren werden demnach 50 eine Ohrlänge von 140 bis 180 mm, d. h. wieder eine ganz ähnliche intermediäre Ohrlänge haben wie die F_1-Bastarde. Wenn

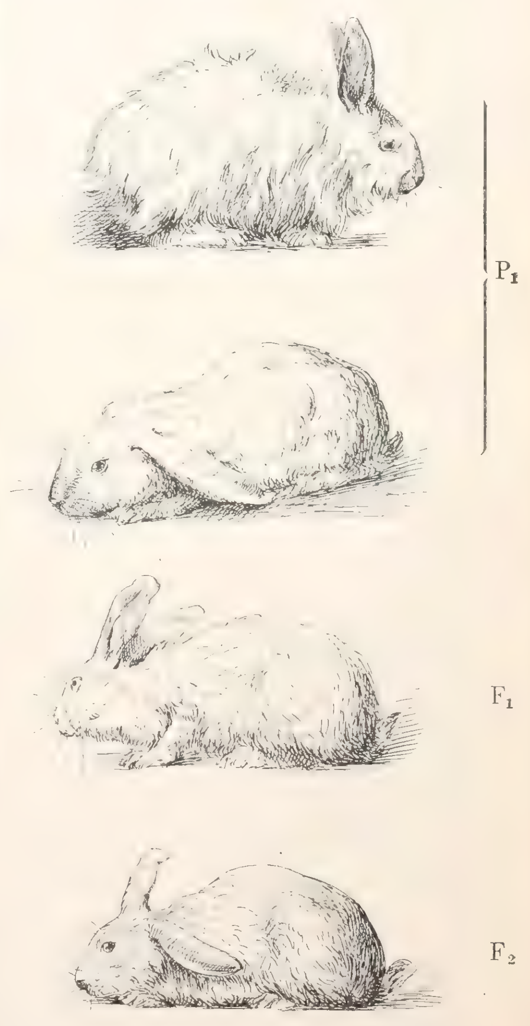


Fig. 4. Vererbung der Ohrlänge der Kaninchen. Nach Castle. Kreuzung eines kurzohrigen und eines langohrigen Tieres giebt eine F_1 Generation mit ungefähr intermediärer Ohrlänge. F_2 zeigt ebenfalls wieder diese intermediäre Länge.

man nicht mit sehr großen Individuenzahlen arbeitet, kann es sich demnach leicht treffen, daß man in F_2 zufällig nur Tiere mit intermediären Ohrlängen findet, und man wird dann den unberechtigten Schluß ziehen, daß hier F_2 genau mit F_1 übereinstimme, daß keine Spaltung erfolge. Unterscheiden sich die beiden Kaninchenrassen in mehr als drei, etwa fünf oder sechs, Erbeinheiten der Ohrlänge, dann ist die Aussicht minimal, in F_2 auch nur eine Andeutung der ganz regelrecht erfolgenden Spaltung zu finden, außer wenn man mit sehr großen Individuenzahlen (Tausenden) operiert, die aber bei Versuchen mit Kaninchen kaum zu erhalten sind.

Diese Erkenntnis, daß ein Außenmerkmal bedingt sein kann von mehreren Genen, die sich in ihrer Wirkung summieren, läßt auch die in Figur 5 dargestellte Haferkreuzung (*Avena sativa*) leicht verstehen. Die Aehrenform des Hafers wird unteranderem bedingt durch zwei Gene X und Y, deren jedes den Winkel vergrößert, in dem die Rispenäste von der Achse abstehen. Eine Rasse xxgg, die keines dieser Gene enthält ist ein Fahnenhafer (Fig. 5f), eine Rasse, die nur eines enthält — XXgg oder xxGG — ist ein Steifrispenhafer (Fig. 5a und b), und eine Rasse XXGG, die *beide* Gene enthält, ist ein Schlaffrispenhafer (Fig. 5d). Die Kreuzung einer Steifrispenrasse XXgg, welche das eine Gen enthält (Fig. 5a) mit einer andern xxGG (Fig. 5b), welche das andre Gen enthält, gibt in F_1 einen Steifrispenhafer XxGg und in F_2 treten neben Steifrispenpflanzen auch Schlaffrispenhafer (die theoretisch zu erwartenden XXGG-Individuen) und Fahnenhafer (die theoretisch zu erwartenden xxgg-Individuen!) auf.

Wenn man die Vererbungsliteratur der letzten Jahre übersieht, so findet man sehr



Fig. 5. Kreuzung eines Steifrispenhafers (a) mit einem anderen Steifrispenhafer (b). Beide (P_1) Rassen sind in sich konstant. Die eine enthält aber ein *anderes* Gen für abstehende Rispenäste wie die andere. Der Bastard c ist ebenfalls ein Rispenhafer und F_2 besteht aus Schlaffrispenhafer (d) Steifrispenhafer (e) und Fahnenhafer (f). Schlaffrispenhafer enthält *beide* Gene, Fahnenhafer enthält *kein* Gen für abstehende Rispenäste.

viele — unnötig viele — Veröffentlichungen über angeblich nicht mit den Spaltungsgesetzen harmonierende Beobachtungen. Man tut gut, alle diese Fälle, soweit sie sich nicht inzwischen schon bei einer etwas gründlicheren Untersuchung aufgeklärt haben, als das zu betrachten, was sie sind: als Material, das vorläufig noch nicht genügend bearbeitet ist, um präzise Schlußfolgerungen zu gestatten, das aber eine eingehendere Untersuchung verdient.

4b) **Artbastarde.** Sehr viel weniger übersichtlich als bei den bisher besprochenen Kreuzungen zwischen einander relativ nahestehenden Sippen einer Großart sind die Befunde bei der Kreuzung von Angehörigen zweier ganz verschiedenen Spezies.

Wir kennen eine große Menge Einzelheiten, aber wir sind noch nicht recht

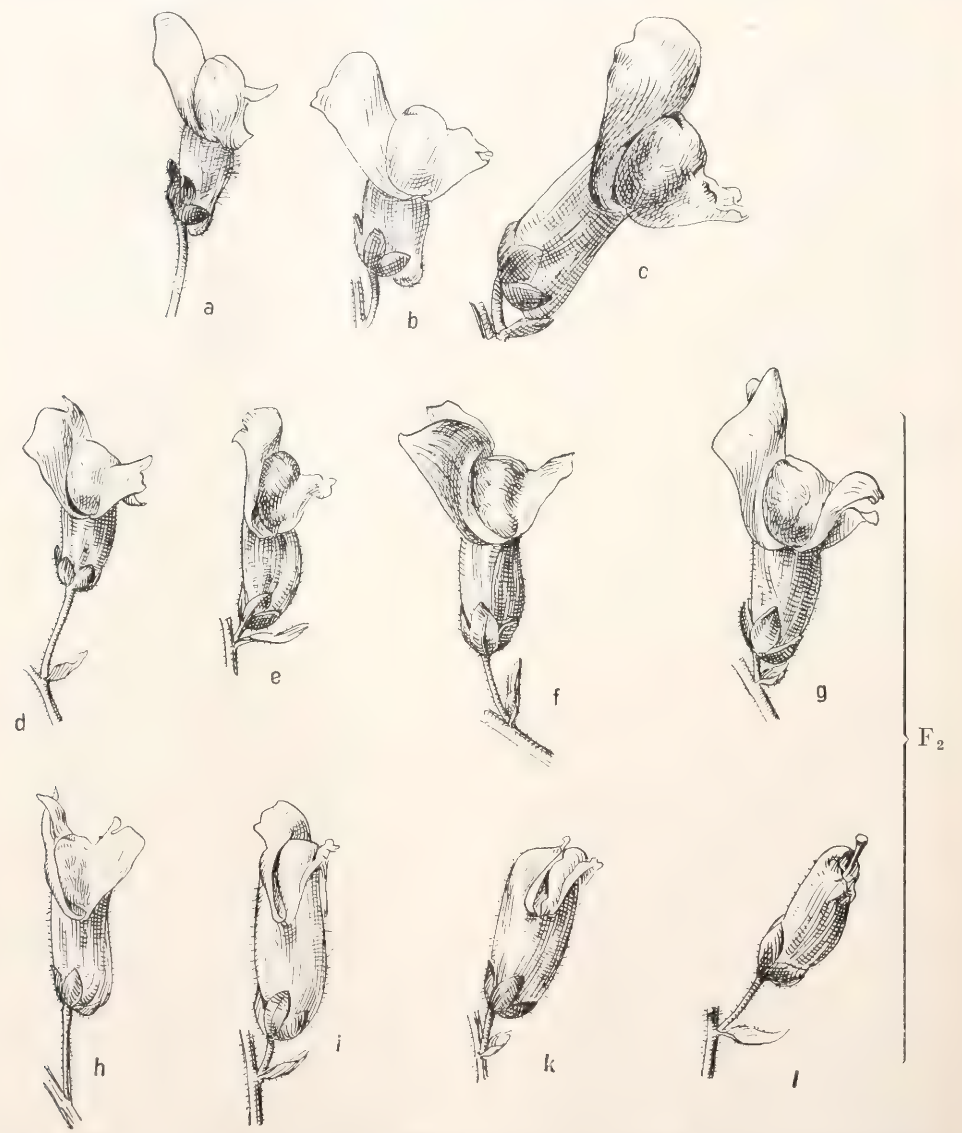


Fig. 6. Vererbung der Blütenform und Blütengröße bei der Kreuzung zweier Löwenmaulspezies: Antirrhinum molle (a) und Antirrhinum majus (c). Der Bastard ist etwa intermediär. In F_2 erfolgt eine unübersehbare Aufspaltung; unter hunderten von Pflanzen sind keine zwei einander gleich. Blütenform, Blütengröße, Kelchform, Länge des Blütenstiels usw. mendeln offenbar unabhängig und sehr kompliziert auf. Eine kleine Auswahl von Blütenformen aus F_2 sind in den Fig. d bis l dargestellt. Blütenformen wie die in k dargestellte kommen in der Gattung Antirrhinum sonst nirgends vor. In F_3 geht die Spaltung weiter.

imstande, große allgemeine Gesetzmäßigkeiten zu erkennen.

Man hat zwar Hunderte von Artkreuzungen im Experiment gemacht und man hat Tausende von Bastarden zufällig gefunden, aber man hat keinen Fall von Artkreuzung genau und sorgfältig, den heutigen Anforderungen genügend, analysiert. Aus diesem Grunde sei auch hier, wo es ja nicht darauf ankommt, vielerlei Einzelheiten zu registrieren, das ganze heute noch sehr wenig geklärte Problem der Artbastarde nur sehr kurz abgehandelt.

Es gibt eine Reihe von Tatsachen, die dafür sprechen, daß, mindestens zum Teil, die für Rassenkreuzungen gefundenen Gesetze auch für Artbastarde gelten. So sind zunächst — bisher nur bei Pflanzen — Fälle bekannt geworden, wo auch die Kreuzung zwischen zwei morphologisch sehr stark verschiedenen Arten, auch hinsichtlich des Verhaltens in späteren Generationen genau das gleiche Ergebnis hat wie eine Kreuzung zwischen zwei Rassen, die sich in sehr zahlreichen mendelnden Erbeinheiten unterscheiden. F_1 ist auch hier eine Kompromißbildung und in F_2 erfolgt eine ganz maßlos komplizierte Spaltung, die eine so große Mannigfaltigkeit von Typen ergibt, daß es schwer hält, unter mehreren 100 Individuen auch nur zwei gleiche zu finden. Unter den hierbei in F_2 auftretenden Typen sind viele den F_1-Bastarden sehr ähnlich, manche nähern sich sehr stark den P_1-Formen, aber außerdem finden sich sehr viele Individuen, welche Eigenschaften aufweisen, die bei keiner der beiden Ausgangsarten vorhanden waren, ja oft sogar Merkmale ganz anderer Gattungen darstellen. Fig. 6 stellt eine solche Spezieskreuzung dar.

Zur Erklärung dieser in F_2 auftretenden Typen hat man vielfach angenommen, daß hier Mutationen — Bastard- oder Hybridmutationen — vorlägen. Diese Annahme ist aber durch nichts begründet, die Annahme, daß es sich nur um neue Kombinationen der heterozygotisch vorkommenden Gene handelt, liegt sehr viel näher. Man kann aus solchen F_2-Generationen durch Auslese einzelner Typen zahlreiche sehr verschiedenartige neue Formen isolieren und rein und konstant züchten und man kann unter Umständen in F_2 einer einzigen Artkreuzung Dutzende von Typen erhalten, die ebenso große morphologische Unterschiede aufweisen, wie sie zwischen den verschiedenen heute bekannten Arten der betreffenden Gattung sonst bestehen. Ganz selten treten in diesen F_2-Generationen auch Individuen auf, die nicht oder fast nicht von den Stammarten (P_1) unterscheidbar sind.

Unter den vielen in F_2 auftretenden neuen Formen, die wie gesagt, sehr wahrscheinlich einfach Neukombinationen sind, finden sich wohl regelmäßig sehr zahlreiche, die sehr wenig lebenstüchtig sind, allerhand Mißbildungen aufweisen und vielfach nur mit großer Mühe weiter fortgepflanzt werden können, sie können z. B. häufig ganz oder teilweise steril sein, auch wenn die F_1-Bastarde völlig fertil waren. Wieder andere dieser neuen F_2-Typen sind dagegen oft sehr kräftige Pflanzen, die die Konkurrenz mit den Stammarten leicht aufnehmen können. Wir gehen wohl nicht fehl, wenn wir annehmen, daß auf diesem Wege der Artkreuzung mit nachfolgender Aufspaltung in F_2 auch in der Natur gelegentlich „neue Arten" entstanden sind. Wie groß aber die Bedeutung spontaner Artkreuzungen für den Vorgang der Artbildung im allgemeinen ist, entzieht sich noch durchaus unserer Kenntnis.

Es liegt demnach in allem ein Befund vor, der zu erwarten ist, wenn man Individuen kreuzt, die sich in sehr vielen, etwa 20 mendelnden Erbeinheiten unterscheiden.

Völlig analysiert ist bisher noch keiner von diesen wahrscheinlich aufmendelnden Artbastarden, die in den Gattungen Antirrhinum, Dianthus Melandrium u. a. beobachtet worden sind.

Außer diesen mendelnden Speziesbastarden gibt es ferner nun auch solche, bei denen nicht mendelnde Merkmale eine größere oder kleinere Rolle spielen. Freilich ist das hierüber vorliegende Beobachtungsmaterial sehr dürftig.

So viele Speziesbastarde bei Pflanzen und Tieren teils im Experiment erzeugt, teils zufällig in der Natur gefunden worden sind, so selten ist genügend zahlreiche Nachkommenschaft aus Selbstbefruchtung oder durch gegenseitige Paarung verschiedener Bastardindividuen gezogen worden, auch da, wo das leicht möglich gewesen wäre. Merkwürdig oft hat man statt dessen Speziesbastarde wieder mit dritten Arten gekreuzt und so mit vieler Mühe „Tripel"- und „Quadrupelbastarde" hergestellt, Versuche, die wissenschaftlich kaum verwertbar sind.

Wenn von einem Speziesbastard F_2 nicht in mindestens einigen hundert Individuen bekannt ist, dann ist es nach dem, was vorhin besprochen wurde, nicht möglich, ein Nichtspalten, etwa die Bildung einer konstanten Bastardrasse zu konstatieren. Zieht man von einem der kompliziert aufmendelnden Artbastarden F_2 nur in etwa 10 bis 20 Individuen, dann wird man meist den Eindruck einer völligen Konstanz gewinnen. Auf solchen ungenügenden Beobachtungen beruhen aber weitaus die meisten, wenn nicht alle älteren Angaben über sofort konstante intermediäre Artbastarde z. B. die

Angaben über die angeblich konstanten Bastarde zwischen Medicago falcata und Medicago sativa zwischen Dianthus Armeria und Dianthus deltoides, ferner die viel zitierte aber unrichtige Angabe über die Konstanz des Aegilops triticoides usw. Auch aus dem Tierreich ist kein einziger Speziesbastard bekannt, der sicher nicht aufspaltet. Das gilt auch für die Bastarde zwischen Menschenspezies etwa zwischen Neger und Europäer. Es hängen eben in dem letztgenannten Falle z. B. die Hautfarbe und ebenso auch die übrigen Rassenmerkmale von sehr zahlreichen selbständig mendelnden Erbeinheiten ab, und wenn zwei gekreuzte Arten sich in nur 20 selbständig mendelnden Genen unterscheiden, so werden von den F_1 Individuen 2^{20} verschiedene Gameten gebildet und in F_2 werden damit $(2^{20})^2$ d. h. über eine Million Millionen Kombinationen ermöglicht. Unter einer Million Millionen F_2 Individuen wird also nur je eines der einen Ausgangsart völlig gleich sein!

Wir sind den Speziesbastarden gegenüber heute in der eigentümlichen Lage, daß wir uns sagen müssen, fast das gesamte bisherige Beobachtungsmaterial sei unbrauchbar, jedenfalls für Schlußfolgerungen ganz unzulänglich, und daß wir hier mit sehr mühsamen Experimenten ganz von vorn anfangen müssen.

Wenn es auch heute für keinen einzigen Fall möglich sein dürfte, nachzuweisen, daß ein sofort konstanter Bastard vorliegt, und wenn auch sichere Fälle bekannt sind, daß Bastarde zwischen stark verschiedenen Arten in die Stammarten und eine ungeheuer große Zahl von neuen Formen aufmendeln, so ist es andererseits doch auch zweifellos, daß längst nicht alle in der Nachkommenschaft von Speziesbastarden vorkommenden Erscheinungen nur auf Mendelspaltungen beruhen. Was aber für andere Gesetzmäßigkeiten hier vorliegen, ist unbekannt. Wir können vorläufig nur eine Menge von uns unverständlichen Tatsachen feststellen.

Hier seien nur einige wenige Beispiele genannt, die zeigen, wie verschiedenartige und aber auch wie wenig verständliche Befunde hier vorliegen: Eine Spezies A und eine Spezies B geben in den beiden reziproken Kreuzungen eine Form C, die ungefähr eine Mittelbildung zwischen den Eltern darstellt. Diese Form C bleibt bei weiterer Fortpflanzung konstant. Diesem Schema entsprechend sollen sich nach älteren Angaben sehr viele Tier- und Pflanzenbastarde verhalten. Ein wirklich sicher hierher gehörender Fall ist aber nicht bekannt. Ferner: Eine Spezies A als Weibchen gibt gekreuzt mit einer Spezies B als Männchen eine Form C, die ungefähr intermediär ist, und die reziproke Kreuzung — Spezies B als Weibchen, Spezies A als Männchen — gibt eine ähnliche aber doch deutlich verschiedene Zwischenform D. Die Deszendenz von C sowohl wie von D ist eine dritte Form E, die dann weiterhin konstant bleibt. Beschrieben für Malva-Bastarde. Oder drittens: Eine Spezies A als Weibchen gibt gekreuzt mit einer Spezies B als Männchen eine Form C und die reziproke Kreuzung gibt eine deutlich verschiedene Form D. Diese beiden Typen C und D erweisen sich weiterhin als völlig konstant. Man erhält durch die reziproken Kreuzungen der Arten A und B direkt zwei neue Sippen C und D, die beide sofort konstant sind.

Solche Typen ließen sich noch sehr viele aufstellen, irgendwie verständlich ist wie gesagt keiner von ihnen und die meisten von diesen Versuchen müssen mit sehr viel größerem Material ausgeführt werden, um sichere Schlußfolgerung zu ermöglichen.

Etwas besser, als über die Vererbungsweise der Artbastarde in späteren Generationen, sind wir unterrichtet über das Aussehen und das Verhalten der F_1-Generation nach Artkreuzungen, d. h. über die Speziesbastarde selber. Während bei der Kreuzung von Rassen die F_1-Generationen ganz einheitlich und gleichartig sind (natürlich nur wenn die gekreuzten Rassen homozygotisch sind!) findet man häufig bei Spezieskreuzungen eine nicht einheitliche F_1-Generation, auch wenn die beiden zur Kreuzung verwendeten Arten bei Inzucht ganz konstant sind. Woran das liegt, ist noch unbekannt. Eine weitere bei Speziesbastarden, besonders tierischen, sehr häufige Erscheinung ist die, daß die beiden möglichen reziproken Kreuzungen ungleiche Produkte geben. Der Bastard Deilephila euphorbiae ♀ (Wolfsmilchschwärmer) × Deilephila vespertilio ♂ (Fledermausschwärmer) sieht anders aus als der Bastard Deilephila vespert. ♀ × Deilephila euphorbiae ♂.[1]) Sehr auffallend ist diese Erscheinung auch bei manchen Oenothera- und Malvakreuzungen. Bei mendelnden Rassenbastarden bestehen derartige Unterschiede nicht. Ein sehr auffälliger Befund ist ferner der, daß manche Speziesbastarde

[1]) Statt Deilephila euphorbiae ♀ × Deilephila vespertilio ♂ schreibt man heute in der Spezialliteratur ganz allgemein nur: Deilephila euphorbiae × Deilephila vespertilio. Es wird also bei der Bezeichnung einer Kreuzung immer die Spezies, welche das Weibchen geliefert hat, zuerst genannt. Es ist demnach zu lesen: Melandrium rubrum × Melandrium album = Weibchen von Melandrium rubrum befruchtet durch Männchen von Melandrium album. Nur einzelne Zoologen haben sich diesem Usus noch nicht gefügt.

schwächliche und wenig lebenstüchtige Organismen sind. Das liegt wohl daran, daß die heterogenen Merkmale der gekreuzten Arten nicht recht harmonisch zusammenpassen. Sehr häufig ist diese Erscheinung aber nicht. Wenn überhaupt lebende Nachkommenschaft aus einer Kreuzung hervorgeht, dann sind die Bastarde meist ebenso kräftige Organismen wie die Eltern, oft sogar sind sie ganz auffallend kräftig und widerstandsfähig gegen allerhand Schädlichkeiten (Maultiere).

Die Bastarde erweisen sich aber häufig als mehr oder weniger unfähig zur geschlechtlichen Fortpflanzung. Diese Sterilität bei Speziesbastarden ist eine längst bekannte Erscheinung, aber ihre Ursachen sind wenig bekannt. Offenbar besteht zwischen der Sterilität der Bastarde und der systematischen Verwandtschaft der gekreuzten Arten eine gewisse Beziehung. Nächstverwandte d. h. morphologisch sehr ähnliche Spezies geben im allgemeinen fertile Bastarde. Wenig verwandte Spezies dagegen geben teilweise oder ganz sterile Bastarde. Die zytologische Untersuchung steriler Bastarde gibt über die Ursache der Störung bei der Geschlechtszellenbildung keinen Aufschluß. Man findet, daß in den verschiedenen Fällen in ganz verschiedenen Stadien der Entwickelung Störungen auftreten. Speziell fällt der Eintritt der Störung durchaus nicht immer mit der Reduktionsteilung zusammen, wie man aus vererbungstheoretischen Gründen hätte denken können. Bei tierischen Bastarden scheint eine Beziehung zu bestehen zwischen systematischer Verwandtschaft und dem Auftreten der Störung in früheren oder späteren Stadien der Entwickelung der Sexualzellen, je ferner sich die Eltern der Bastarde stehen, in desto früheren Stadien der Ovo- und Spermiogenese setzt die Störung ein. Häufig ist die Sterilität in den beiden Geschlechtern ungleich, d. h. etwa die Bastardmännchen sind zeugungsfähig die Bastardweibchen dagegen sind steril, oder umgekehrt. Oft ist die Sterilität in beiden Geschlechtern nur eine teilweise, nur ein Teil der Sexualzellen ist funktionsfähig, man bekommt zwar Nachkommenschaft von den Bastarden, aber nur in beschränkter Anzahl.

Vegetativ sind gerade die ganz oder teilweise sterilen Bastarde häufig ungemein kräftig und üppig und übertreffen oft an Größe die Stammarten ganz beträchtlich, und von irgendwelchen sonstigen Störungen oder Mißbildungen ist bei ihnen nicht die Rede. Bastarde zwischen Jagdfasan und Haushuhn z. B. sind zwar sterile aber sonst ganz normal entwickelte kräftige Tiere. Vegetativ durch Stecklinge, Ausläufer u. dgl. lassen sich auch alle sterilen Pflanzenbastarde leicht vermehren und tun es auch vielfach spontan. Dabei scheint es vorzukommen, daß anfänglich sterile Bastarde später doch fertil werden.

5. Falsche Bastarde. Faux hybrides. Pseudogamie. In manchen Fällen gibt die Befruchtung eines Weibchens einer Spezies durch ein Männchen einen anderen, zwar Nachkommenschaft aber diese hat rein mütterliche Eigenschaften und sie erweist sich auch bei der Weiterzucht als rein und konstant von der mütterlichen Art. So ergibt die künstliche Befruchtung von Sphodromantis bioculata (Gottesanbeterin) durch eine andere Gattung: Mantis religiosa reine Sphodromantis-Individuen, die Befruchtung einer Brombeere, Rubus nemoralis Aresch. durch Rubus caesius L. gibt neben typischen Bastarden auch regelmäßig eine Anzahl reiner, auch in ihrer Deszendenz konstanter mütterlicher (nemoralis) Pflanzen. Völlig erklärt ist diese Erscheinung, die man auch als Monolepsis (in diesem Falle nach der Mutter hin) bezeichnet hat, heute noch nicht, es ist aber im höchsten Grade wahrscheinlich und für Mantis kaum mehr zweifelhaft, daß es sich hier um einen Fall von parthenogenetischer Entwickelung der Eizelle handelt, die nur durch die äußerliche Reizung der Sexualorgane — Einführung eines Spermatophors bei Mantis, bzw. Bestäubung der Narbe bei Rubus — ausgelöst wird. Diese durch einen äußerlichen Befruchtungsreiz ausgelöste Parthenogenesis bezeichnet man als Pseudogamie. Bastarde, die sich selbst und auch in ihrer Deszendenz als rein väterlich erwiesen haben, sind nicht bekannt.

Um eine der Pseudogamie ähnliche Erscheinung handelt es sich auch, wenn z. B. durch die Besamung von Seesterneiern durch Sperma einer Muschel eine Befruchtung erzielt wird.

Auch hier wird nur eine parthenogenetische Entwickelung der Seeigeleier ausgelöst, die ja hier auch leicht durch verschiedene andere Einwirkungen erzielt werden kann. Rein mütterliche Bastarde sind aber auch aus Kreuzungen bekannt, wo sicher ein Sexualakt stattfindet, so bei der Besamung von Echinus-Eiern durch Antedon-Sperma. Vielleicht liegt im Grunde genommen trotzdem auch hier nur eine Art Pseudogamie vor, indem der männliche Kern nach der anscheinend regelrechten Befruchtung noch nachträglich eliminiert wird. Manche Beobachtungen sprechen für eine solche Auffassung.

6. Bedeutung der Bastardierung für die Artbildung. Mit unseren geringen Kenntnissen von den Vererbungsgesetzen der

Speziesbastarde hängt es zusammen, daß wir, wie S. 869 schon erwähnt, über die Bedeutung von spontanen Artkreuzungen für die Artbildung sehr schlecht unterrichtet sind. Daß aus der Kreuzung zweier Arten, die miteinander aufmendeln, sehr zahlreiche neue Formen hervorgehen können, ist zweifellos. Wir kennen ferner aus dem Tier- und Pflanzenreich viele Befunde von wilden „Arten", in den Gattungen Rubus, Rosa, Cirsium u. a., bei denen sehr vieles dafür spricht, daß sie aus der Kreuzung zweier anderer Arten hervorgegangen sind. Aber von neueren Gesichtspunkten aus, unter Berücksichtigung der neu erkannten Vererbungsgesetze, ist diese ganze Frage noch nicht behandelt, vor allem fehlen umfassende Spezialuntersuchungen noch völlig.

7. Xenien. Telegonie. Pfropfbastarde. Bei der Ausführung von Bastardierung beobachtet man gelegentlich eine eigentümliche als Xenienbildung bezeichnete Erscheinung. Was man darunter versteht, zeigt uns am besten ein Beispiel bei Mais (Zea Mays L.). Wenn man eine bei Inzucht konstante Zuckermaisrasse mit runzeligen Samen betäubt mit Pollen einer Maissorte, die stärkehaltige und infolgedessen glatte pralle Samen hat, dann bekommt man schon auf der ursprünglichen Zuckermaismutterpflanze Kolben mit stärkehaltigen glatten prallen Samen. Dabei rührt die Form der Körner nicht etwa von den darin liegenden Embryonen her, sondern vom Endosperm. Diese Erscheinung, daß auch außerhalb des Bastardembryos liegende Teile der Frucht bei einer Bastardierung Merkmale der väterlichen Rasse annehmen, bezeichnet man als Xenienbildung. Beispiele davon sind in großer Zahl beschrieben worden, darunter auch einige uns sehr merkwürdig anmutende, so soll ein gelbfrüchtiger Apfelbaum auf Zweigen, die durch Pollen eines rotfrüchtigen Apfelbaums bestäubt waren, rote Aepfel getragen haben. Die Untersuchungen von Correns haben diese Dinge völlig aufgeklärt, es hat sich gezeigt, daß in allen Fällen von Xenienbildung, die sich bei einer Nachprüfung als stichhaltig erwiesen, der väterliche Einfluß zwar über den Embryo hinaus im Endosperm noch nachweisbar war, aber Fälle wo andere Teile der Frucht noch irgendwie beeinflußt wurden, sind nicht bekannt.

Daß auch das Endosperm der angiospermen Pflanzen väterliche Merkmale aufweist, ist verständlich, seit wir wissen, daß es selbst aus einer Art Sexualakt hervorgeht, aus der Vereinigung des von der Mutter stammenden sekundären Embryosackkernes, mit dem zweiten generativen Kern. Wir können ja das Endosperm entwickelungsgeschichtlich als einen zweiten Embryo auffassen, der dem anderen Embryo zur Nahrung dient. In dieser Weise erklären sich alle sichergestellten Fälle von Xenienbildung bei Pflanzen. Noch nicht recht verständlich und einer eingehenden Untersuchung wert sind aber einige neuere nur kurz veröffentlichte Beobachtungen von Tschermak, der fand, daß bei Kreuzungen zwischen Gurken und Melonen schon die Bastardfrüchte, d. h. Teile der Mutterpflanze in ihrem Zuckergehalt von der den Pollen liefernden Art beeinflußt erscheinen. Auch aus dem Tierreich sind ähnliche Erscheinungen beschrieben, so soll bei Vögeln die Farbe der Eischalen von einem Bastardembryo her beeinflußt werden. Dagegen ist die bei manchen Tierzüchtern noch verbreitete Ansicht, daß von einem Bastardembryo her auf die Mutter ein noch viel weitergehender Einfluß — Telegonie — ausgeübt werde, ganz unbegründet. Daß z. B. eine Pferdestute, die durch einen Quaggahengst gedeckt war und einen Bastard geboren hatte, weiterhin auch nach Deckung durch einen Pferdehengst Nachkommen mit deutlichen Quaggamerkmalen gebären solle, ist mehrfach behauptet worden, aber alle neueren einwandsfreien entsprechenden Versuche, auch mit anderen Tieren, haben die Haltlosigkeit dieser Angabe erwiesen.

Man hat sich auch die Frage vorgelegt, ob wohl Ovarien einer Rasse, etwa eines schwarzen Meerschweinchens, die in ein Tier einer anderen Rasse etwa in ein weißes Meerschweinchen transplantiert sind, von dem Tier, in dem sie sich befinden, irgendwie beeinflußt werden. Es hat sich gezeigt, daß das nicht der Fall ist. Ein weißes Meerschweinchenweibchen, dessen Eierstöcke man durch Eierstöcke eines schwarzen Meerschweinchens ersetzt hat, verhält sich weiterhin in reiner Deszendenz wie ein rein schwarzes Tier.

Analoge Transplantationsversuche mit Hühnern sollen ergeben haben, daß doch vom Muttertier auf die transplantierten Eierstöcke fremder Herkunft ein Einfluß ausgeübt wurde. Diese Versuche sind aber durchaus nicht einwandsfrei durchgeführt und nicht beweiskräftig.

Mit den Bastarden haben die als Pfropfbastarde bezeichneten, nur aus dem Pflanzenreich bekannten Gebilde, soweit sie genau untersucht sind, nur den Namen gemeinsam. Die viel besprochenen sogenannten Pfropfbastarde Cytisus Adami, die Crataegomespili usw. sind keine einheitlichen den Bastarden vergleichbare Individuen, sondern sind Pflanzen, die aus zwei verbotenus ineinander geschachtelten Arten bestehen.

Der Cytisus Adami ist so z. B. in Wirklichkeit ein Laburnum vulgare (Goldregen), der in einer Epidermis von Cytisus purpureus steckt. Daß derartige eigentümliche Doppelwesen, „Periclinalchimaren" sich vegetativ unbeschränkte Zeit hindurch erhalten lassen, hängt mit dem Bau des Vegetationspunktes der höheren Pflanzen zusammen, der aus mehreren Zellschichten besteht, von denen die äußerste im allgemeinen nur die Epidermis liefert, während die folgenden andere ganz bestimmte Organe aus sich entstehen lassen. So entstehen z. B. für gewöhnlich die Pallisadenzellen der Blätter aus der zweitäußersten Zellschicht. Ist also erst einmal ein Vegetationspunkt zustande gekommen, dessen verschiedene Schichten aus Zellen zweier verschiedener Pflanzen bestehen, so bleibt vegetativ eine solche Pflanze als Doppelwesen erhalten. Vegetationspunkte, die aus Zellen von zweierlei Arten aufgebaut sind, können leicht entstehen in Form von Adventivvegetationspunkten aus dem Wundgewebe einer Transplantation, in dem sich die Zellen der beiden verwachsenen Arten sehr weitgehend ineinander verfilzen können.

Die Sexualzellen der höheren Pflanzen entstehen aus Abkömmlingen der zweitäußersten Zellschicht des Vegetationspunktes und dementsprechend besteht die sexuelle Deszendenz der daraufhin genau untersuchten „Propfbastarde" aus Sämlingen derjenigen Spezies, welcher in dem betreffenden Falle die zweitäußerste Zellschicht angehört.

Ob durch Verschmelzung zweier vegetativer Zellen bastardartige Organismen entstehen können, ist nicht bekannt. Eine besonders in der älteren Literatur immer wiederkehrende Angabe, daß einfach durch Zusammenpfropfen zweier Rassen oder Arten diese in ihren erblichen Eigenschaften geändert werden können, daß quasi Eigenschaften des einen Pfropfsymbionten auf den anderen überwandern könnten, ist nicht richtig. Die ja allerdings sehr häufig zu beobachtenden Veränderungen des einen oder des anderen Propfsymbionten sind nicht erbliche Ernährungsmodifikationen, die mit dem Aufhören der Pfropfsymbiose wieder verschwinden. Die als eine solche „Merkmalsübertragung auf vegetativem Wege" gedeutete Uebertragung gewisser Arten von Gelbfleckigkeit der Blätter beruht auf einer sehr sonderbaren wenig bekannten Infektionskrankheit, die sehr wahrscheinlich nicht parasitärer Natur ist und einer weiteren Untersuchung wert wäre.

8. Bastardierung in der Züchtungspraxis. Von sehr großer Wichtigkeit ist die Ausführung von Bastardierungen in der Pflanzen- und Tierzüchtung. Die Erkenntnis, daß nahezu alle Rassenunterschiede auf einer Anzahl selbständig mendelnder Erbeinheiten beruhen, daß im Grunde genommen jeweils eine bestimmte Rasse nur eine gewisse Kombination dieser Erbeinheiten darstellt, ermöglicht es, in ganz systematischer Weise, durch Rassenkreuzungen mit darauf folgender Aufspaltung in F_2 neue Kombinationen zu erzeugen, die vorteilhafter sind als die bisher kultivierten, und die auf Grund der Kenntnis der Spaltungsgesetze unschwer rein und konstant gezüchtet werden können. Die Zahl der möglichen Kombinationen von Erbeinheiten einer Kulturpflanze oder eines Haustieres, d. h. die Zahl der möglichen leicht erzeugbaren verschiedenen Rassen ist eine ungeheuer große, die Zahl der jeweils in Kultur befindlichen ist nur ein winziger Bruchteil der überhaupt möglichen und leicht herstellbaren. In der Züchtungspraxis, besonders bei der Getreidezüchtung, wird denn auch heute schon in sehr großem Umfang von Rassenkreuzungen ausgegangen.

In zweiter Linie ist die absichtliche Bastardierung für die Züchtungspraxis wichtig, weil wir in der Kreuzung zweier nahe verwandter Spezies sehr oft ein Mittel in der Hand haben, mit einem Schlage eine ganz unübersehbar große Zahl neuer Rassen als Material für künstliche Zuchtwahl zu erzielen.

Zu einem großen Teil beruht die starke „Variabilität", welche frisch in Kultur genommene Pflanzen und Tiere häufig zeigen, darauf daß mehr oder weniger unabsichtlich dabei Kreuzungen zwischen nahestehenden Arten vorgenommen wurden. Der größte Teil der Kulturrassen etwa unserer Gartenpetunien, rührt so, um nur ein Beispiel zu nennen, her, aus der Kreuzung zweier wilder Spezies mit nachfolgender sehr komplizierter Aufspaltung.

Literatur. *Aeltere grundlegende Werke:* **G. Mendel,** *Versuche über Pflanzenhybriden, Verhandl. des Naturf.-Vereins Brünn, Bd. 10, 1865, Abh. S. 1 bis 47. In Ostwalds Klassiker d. exact. Wissensch. Bd. 121.* — **W. O. Focke,** *Die Pflanzenmischlinge, Berlin 1881, 569 S.* — **A. Ackermann,** *Tierbastarde. Zusammenstellung der bisherigen Beobachtungen, Abhandl. u. Berichte des Vereins für Naturkunde in Kassel, Bd. 42, 1896/1897, S. 103 bis 121, Bd. 43, 1897/1898, S. 1 bis 79.* — *Neuere deutsche zusammenfassende Werke und Lehrbücher:* **E. Baur,** *Einführung in die experimentelle Vererbungslehre, Berlin 1911, 293 S., 80 Textfig., 9 farb. Taf.* — **C. Correns,** *Ueber Vererbungsgesetze. Vortrag. Berlin 1905.* — **R. Goldschmidt,** *Einführung in die Vererbungswissenschaft, Leipzig 1911, 502 S., 161 Textfig.* — **V. Haecker,** *Allgemeine Vererbungslehre, Braunschweig 1911, 392 S., 135 Textfig., 4 Taf.* — **W. Johannsen,** *Elemente*

der exakten Erblichkeitslehre, Jena 1909, 515 S., 31 Textfig. — **H. Przibram**, *Experimentalzoologie, Bd. 3, Phylogenese. Leipzig und Wien 1910, 315 S., 24 Taf. Eine Zusammenfassung der durch Versuche ermittelten Gesetzmäßigkeit tierischer Artbildung.* — **R. C. Punnett**, *Mendelismus, Brünn, 1910, 117 S.* — **H. de Vries**, *Die Mutationstheorie. Versuche und Beobachtungen über die Entstehung von Arten im Pflanzenreich. Bd. 2, Elementare Bastardlehre, Leipzig 1903, 752 S., 4 farb. Taf., 159 Textfig.* — *Ausländische Lehrbücher:* **W. Bateson**, *Mendels Principles of Heredity, Cambridge 1909, 396 S., 6 farb. Taf., 3 Portr., 33 Textfig.* — **W. E. Castle**, *Heredity, New York and London 1911, 181 S., 53 Textfig.* — **A. D. Darbishire**, *Breeding and the Mendelian Discovery. London, New York 1911. 8° 282 S. 4 farb. Taf., 34 Textfig.* — **R. H. Lock**, *Recent Progress in de Study of Variation, Heredity and Evolution, London 1909, 334 S., 5 Portr., 47 Textfig.* — *Spezialzeitschriften: Zeitschrift für induktive Abstammungs- und Vererbungslehre, Berlin.* — *Journal of Genetics, Cambridge.*

E. Baur.

Bauhin

Kaspar.

Einer der „Väter der Botanik". Geboren am 17. Januar 1560 zu Basel, studierte dort von 1572 (also zwölfjährig) bis 1576 Philosophie und darauf Medizin, besonders Anatomie und Botanik, ging im folgenden Jahr nach Pavia, das einen berühmten botanischen Garten besaß und bereiste von dort aus das übrige Italien. 1578 studierte er in Montpellier, von 1579 bis 1580 in Paris und kehrte nach einem kurzen Besuch von Tübingen im selben Jahre nach Basel zurück, wo er ein Jahr später promovierte. Dort erhielt er auch 1583, nachdem er inzwischen als Arzt und Dozent tätig gewesen war, die neu gegründete Professur für Anatomie und Botanik, 1614 übernahm er an Stelle dieser die Professor für praktische Medizin. Seit 1596 war er auch Herzoglich Württembergischer Leibarzt. Er starb zu Basel am 5. Dezember 1624. Neben einigen anatomischen Werken (Anatomie 2 Bände, Basel 1588 und 1591 usw.) gehören seine Hauptleistungen der Botanik an. Er stand mit Botanikern aus allen Ländern in Beziehung und beabsichtigte eine Sichtung und Beschreibung aller zu seiner Zeit bekannten Pflanzen zu geben, von der als Vorläufer sein Phytopinax (1596), in der 164, sein Prodromus theatri botanici (Frankfurt 1620), in der 250 neue Pflanzen beschrieben und z. T. abgebildet werden. 1623 erschien Pinax theatri botanici mit einem Index von etwa 6000 Pflanzen worin eine für die damalige Zeit fast vollständige, noch heute unentbehrliche Synonymie gegeben wurde. Von dem geplanten Hauptwerk gab sein Sohn Johann Kaspar Bauhin nach dem Tode des Vaters wenigstens das erste von 12 Büchern heraus (1658). Die Anordnung der Pflanzen bei Bauhin geschieht zwar noch nach äußeren habituellen Gesichtspunkten, doch hat er bereits zahlreiche natürliche Gruppen (z. B. Monokotylen) und Familien richtig erkannt. Besonders bemerkenswert ist auch die kurze Prägnanz seiner Diagnosen und die Anbahnung einer binären Nomenklatur.

Literatur. **W. Hess**, *Kaspar Bauhin. Basel 1860.*

W. Ruhland.

Baum.

1. Begriffsbestimmung. 2. Leistungen und Gestalt des Baumstammes. Licht- und Schatthölzer. Höhenwuchs. 3. Bau der Baumkrone. 4. Das Blattkleid. 5. Wurzel. 6. Blühen und Fruchten. 7. Anatomisches. Wasserverbrauch. Dickenwachstum. Alter. Tod. 8. Natürliches Vorkommen der Bäume. Wälder.

1. Begriffsbestimmung. Unter einem Baum versteht man im einfachsten Falle eine Holzpflanze, die einen einzigen aufrechten Stamm entwickelt, der sich gar nicht oder erst in einer gewissen Höhe in eine Anzahl gleichberechtigter Zweige auflöst, oder wenn er bis zum Fuße beastet ist wie bei freiständigen Fichten, sich vor den Aesten doch durch kräftigere Ausbildung hervortut. Werden mehrere Stämme entwickelt, so spricht man, wenn die Stämme mehr als etwa 5 m Höhe und eine Stärke von mehr als etwa 10 cm erreichen, von einem mehrstämmigen Baum, bei geringeren Maßen von einem Baumstrauch, Großstrauch oder gewöhnlichen Strauch. Auch bei einstämmigen Bäumen pflegt eine gewisse Größe vorausgesetzt zu werden. Sinkt diese unter ein gewisses Maß, so spricht man von Pflanzen baumartiger Tracht. Zu diesen rechnet man auch holzige und selbst krautige Gewächse, die aus kriechenden Sprossen aufrechte kronentragende Stämme erzeugen; so das kaum 5 cm hohe Moos Climacium dendroides, die Bananen, deren Stamm fast nur aus den unteren Teilen der Riesenblätter besteht, und die großen Bambusarten, deren feste, holzige Stämme, obwohl sie im Bau eher an Grashalme sich anschließen, dem Ansehen nach als Bäume zu bezeichnen sind und z. B. in der richterlichen Praxis in Niederländisch-Indien auch so bezeichnet werden.

Krummholz- oder Knieholzpflanzen, d. h. Holzpflanzen mit kräftigen Stämmen, die sich aber dicht am Erdboden ausbreiten, wie die Stämme der Legföhren (Pinus montana v. pumilio) der Alpen, gehören streng genommen nicht hierher. Ebensowenig die Holzstauden, deren „Erdstämme" nur durch geringe Stärke vom Knieholz verschieden sind.

Zu einer weniger äußerlichen Bestimmung der Begriffe Baum und Strauch gelangt man, wenn man die Entwickelung der beiderlei Gebilde heranzieht. Der Baumstamm entsteht durch langdauerndes kräftiges Spitzenwachstum einer aufrechten Achse (Palmen) oder durch geradlinige Aneinanderreihung mit Spitzenwachstum begabter Sprosse (Nadelhölzer, dikotyle Laubhölzer), die entweder aus den Endknospen der aufrechten Jahrestriebe oder aus deren oberster Seitenknospe (Linde, Birke, oft auch Buche und Eiche) hervorgehen. Bei den Sträuchern nimmt die Wachstumsenergie der aufrechten Achsen rasch ab. Sie bestehen entweder aus je einem einzigen Sproß, der keine entwickelungsfähige Gipfelknospe besitzt, oder aus wenigen immer schwächer werdenden Sproßgenerationen. Dazu kommt, daß beim Baum die obersten Seitenzweige eines jeden aufrechten Sprosses sich meist stärker entwickeln als die übrigen, während bei dem Strauch gerade die untersten Seitentriebe die stärkste Entwickelung erfahren, sich aufrichten und ihren Muttersproß im Wachstum einholen. Am einfachsten ist unter unseren europäischen Bäumen die Stammbildung bei Tannen, Fichten, Lärchen und Erlen (Alnus glutinosa) zum Ausdruck gelangt. Hier haben wir eine einzige Hauptachse, die von der Wurzel bis zur äußersten Baumspitze durchgeführt ist. Um sie gruppieren sich die Seitentriebe so regelmäßig, daß Roßmäßler jene Nadelhölzer ein mathematisches Geschlecht nennen konnte. Bei der Kiefer und fast allen unseren Laubhölzern beginnt früher oder später die Ausbildung einer vielästigen Krone, indem die Wuchskraft des bisherigen Haupttriebs abnimmt und selbst unter die seiner Nachbarsprosse herabsinkt. Besonders bedeutungsvoll für das Zustandekommen eines augenfälligen Gegensatzes zwischen dieser Krone und dem Stamm ist die Erscheinung der „Reinigung", d. h. des Absterbens und Abfallens der unteren Baumzweige, wodurch eben der Stamm zur glatten Walze wird. Die Reinigung tritt bei vielen Bäumen infolge der Beschattung durch die Nachbarn in dichtem Stande, bei anderen auch in Einzelstellung freiwillig oder durch den eigenen Kronenschatten ein.

2. Leistungen und Gestalt des Baumstammes. Die Leistung des Stammes für den Baum ist in erster Linie die eines Trägers der Krone. Er hebt die Blätter zum Lichte empor und ermöglicht ihnen die Ausbreitung in einer Lage, in der der Kampf um den Raum möglichst gering ist. Alle niedrigen Gewächse, namentlich die so stark konkurrierenden Rasen- und Polsterpflanzen wie Gräser und Moose, auch die Sträucher bleiben in der Tiefe zurück und die Krone gewinnt Raum zu fast beliebiger Entfaltung, der nur die spezifische Wuchskraft, die mit der Entfernung vom Erdboden wachsende Erschwerung der Wasserversorgung und der zur Erhaltung und Vermehrung der Tragfähigkeit des Stammes und der Aeste notwendige Aufwand an Baustoffen eine Grenze setzen. Es ist kein Zufall, daß gerade die stammbildenden Pflanzen die größte Menge organischer Substanz erzeugen und am massenhaftesten Samen hervorbringen.

In den ersten Lebensjahren freilich haben auch stammbildende Pflanzen die ganze Konkurrenz der Umwelt zu bestehen, soweit nicht die Mutterbäume durch ihre humusbildenden Abfälle und eine den Graswuchs hintanhaltende Schattenwirkung ihnen ein günstiges Keimbett schaffen. Große Lebenszähigkeit, die die kleinen Pflänzchen auch jahrelang sich wiederholende Verstümmelungen ertragen läßt, hilft ihnen über diese Zeit hinweg, sobald nur einmal die Keimwurzel den Weg in passenden Nährboden gefunden hat. Sind sie erst etwas erstarkt, so kann schon in den ersten Jahren ein bedeutendes Höhenwachstum sie über die nächste Umgebung emporheben. Auf diese Weise arbeiten sich Holzpflanzen mit orthotropem (aufrechtem) Hauptsproß wie Lärchen, Zitterpappeln, Weiden, Birken, Eschen und Erlen aus dem Gewirr von Gräsern, Seggen, Binsen, Beersträuchern oder Heidekraut heraus, das in unserem Waldklima den anfangs kahlen Boden neuer Schläge zu bedecken pflegt. Andere Baumarten wie Buche, Hainbuche, Linde und Weißtanne gehen in der Jugend mehr in die Breite, sei es, weil ihre Gipfeltriebe, namentlich an schattigen Standorten plagiotrop (geneigt) sind (Buche, Hainbuche, Linde), sei es, weil ihre Hauptachse hinter den Seitenzweigen erster Ordnung im Wachstum zurückbleibt (Weißtanne). Die Eiche verbindet mit Entwicklung in die Breite starken jugendlichen Höhenwuchs.

Licht- und Schatthölzer. Die genannten Bäume mit raschem jugendlichem Höhenwachstum gehören zu denen, die der Forstmann Lichtholzarten nennt. Man pflegt ihnen ein besonders großes Lichtbedürfnis zuzuschreiben, weil sie nur in verhältnismäßig weiträumigen Beständen gedeihen und weil ihre Kronen kein dichtes Schattendach bilden, sondern die Lichtstrahlen bis in ihr Inneres eindringen lassen. Die Bäume der zweiten Gruppe, mit der Fichte und Eibe, werden wohl als Schattholzarten bezeichnet, weil sie dunklere Bestände bilden und auch bei geringerem Lichtgenuß sich noch befriedigend entwickeln. Der Forstmann kann sie deshalb in relativ dichter Stellung erziehen, wodurch die Ausbildung eines astreinen Stammes begünstigt und die Bodenpflege erleichtert wird. Eigentliche Schattenpflanzen, d. h. Pflanzen, die in schwachem Lichte besser gedeihen als in voller Tagesbeleuchtung, gibt

es unter unseren Bäumen nicht. Doch ist ihr Vermögen, auf stärkere Beleuchtung durch gesteigerte Holzmassenerzeugung zu antworten, verschieden. Blühen und Fruchten dürfte bei allen Bäumen durch freien Stand befördert werden.

Von Interesse ist es, daß die Wachstumsweise und der Blattbau, den eine junge Holzpflanze (Buche) je nach ihrem Heranwachsen in hellem Lichte oder im Schatten angenommen hat, bei Ueberführung in das entgegengesetzte Lichtklima sich jahrelang erhalten können (Arnold Engler Mitt. d. schweizerischen Zentralanstalt für das forstliche Versuchswesen X 2 Zürich 1911).

Daß es übrigens nicht nur der Lichtbedarf, sondern auch der Verbrauch an Wasser und Mineralstoffen ist, der den sogenannten Lichtholzarten einen größeren Standraum zum Bedürfnis macht, zeigt sich darin, daß auch sie auf besserem Boden in dichteren Beständen gedeihen.

Höhenwuchs. Das Höhenwachstum der Bäume ist nach Ablauf der ersten Jugendzeit in so hohem Maße von äußeren Umständen abhängig, daß die Forstleute danach die Güte der Standorte beurteilen. Trotzdem besitzt jede Art ihr eigenes Wachstumsgesetz, das als ihre große Periode bezeichnet wird. Der jährliche Längenzuwachs erreicht bald rascher bald langsamer, stets aber in verhältnismäßig frühem Alter ein für jede Art besonderes Maximum und sinkt dann, ebenfalls in verschiedenem Tempo, wieder ab oder erhält sich bis ins höchste Alter auf einer gewissen Höhe. Diese Verhältnisse sind von Wichtigkeit für den Kampf der Bäume untereinander. Das raschere Wachstum bis zum 50. Jahre etwa gibt z. B. der Buche auf den meisten Standorten im Kampf mit gleichaltrigen Eichen das Uebergewicht; mit dem 60. Jahre ist für diese die Gefahr überwunden, da in diesem Alter der Zuwachs der Buche zurückzubleiben anfängt.

Die beigefügte Tabelle zeigt die große Periode einer Anzahl von wichtigen Waldbäumen, wie sie sich im Verhalten ganzer Bestände ausspricht. Vorausgehen Zahlen über das Wachstum einiger Arten in der ersten Jugend, an einzelnen Individuen gemessen, nach Flury (Mitteil. d. schweiz. Zentralanstalt f. d. forstl. Versuchswesen Bd. 4 1895).

Die größten Höhen, die Bäume überhaupt erreichen, zeigen folgende Beispiele: Eucalyptus amygdalina 155 m (Australien); Sequoia gigantea 102 m (Kalifornien); Pseudotsuga Douglasii 90 m (Kalifornien); Ceiba pentandra 60 m und mehr (Kamerun); Altingia excelsa 56 m und mehr (Java); Picea excelsa 50 m; Abies pectinata 50 m; Eucalypten am Lago maggiore erreichten in 9 Jahren 20 m Höhe.

Sonderfälle von Höhenwachstum finden sich bei den Palmen. Die Oelpalme z. B. wächst in

Holzart	Altersstufen in																
	1		2		3		4		5		6		7		8		9
	Mittlere Höhen in cm																
Kiefer *)	3	4	7	11	18	16	34	20	54	68	122		—		—		—
Lärche	3	11	14	30	44	26	70	10	80	12	92	9	101	11	112	28	140
Fichte	5	6	11	5	16	8	24	10	34	5	39	18	57	13	70	32	102
Weymouthskiefer	2	2	4	3	7	6	13	15	28	28	56		—		—		—
Tanne	3	2	5	2	7	4	11	4	15	8	23	6	29	4	33	2	55
Eiche	10	8	18	11	29	23	52	25	77	22	99	21	120		—		—
Esche	7	11	18	23	41	16	57	45	102	19	121		—		—		—
Schwarzerle	9	38	47	170	217	123	340		—		—		—				—
Birke	2	37	39	63	102	107	209		—		—		—		—		—
Buche	9	4	13	7	20	11	31	7	38	13	51				—		—
Linde, großbl.	5	15	20	10	30	11	41	52	93	22	115	23	138	26	164	48	212

*) Die eingeschalteten Zahlenreihen geben den jährlichen Zuwachs in cm an. Die Schlußkolumn

den ersten Jahren ihres Lebens nur unmerklich in die Höhe. Die Gipfelknospe des unverzweigten Stammes erzeugt aber immer größere Blätter und erstarkt, bis sie nach etwa 5 Jahren die Fähigkeit erlangt hat, einen tragfesten Stamm zu erzeugen. Bei amerikanischen Sabal- und Ceroxylonarten wächst die Stammspitze während der Erstarkungsperiode sogar abwärts in den Erdboden hinein.

Nach den Erfahrungen der Forstleute, die zur Berechnung des Ertrags der Forsten eine möglichst genaue Formel für Holzmaße oder Rauminhalt der Baumstämme gebrauchen, liegt deren Form bei unseren einheimischen Waldbäumen zwischen der des Zylinders und eines abgestumpften Kegels.[1]) Das unterste Stammstück, von 1,30 m („Brusthöhe") über dem Boden an gerechnet, gleicht dabei einem abgestumpften Kegel mit eingebauchter Seitenfläche (Neiloid), der mittlere Stammteil einem Paraboloid und der oberste kann als Kegel angesehen werden. Je näher die Form des Stammes dem Zylinder kommt, desto „vollholziger" ist er, während man rasch nach oben sich verjüngende Stämme abholzig nennt. An dem geradwüchsigen und bis zur Baumspitze durchgeführten Stamm der Fichte hat Metzger zeigen können, daß er ein Träger gleichen Widerstandes ist, an dessen einem Ende eine biegende Kraft angreift.

Es wäre Materialverschwendung, solche Träger ihrer ganzen Länge nach gleich stark zu machen. Sie dürfen sich vielmehr nach dem Angriffspunkte der biegenden Kraft hin verjüngen, weil mit der Annäherung an diesen Punkt der wirksame Hebelarm immer kürzer wird. Je stärker aber die biegende Kraft ist, desto rascher muß die Stärke des Trägers nach seiner Basis hin zunehmen.

Im Einklang damit sind die Fichtenstämme um so abholziger, d. h. sie nehmen um so rascher nach ihrer Basis hin an Stärke zu, je stärker die Krone vom Winde erfaßt werden kann (Wettertannen). Veränderungen der Stammform während des Dickenwachstums lassen sich z. T. aus Veränderungen in der Exposition der Krone dem Wind gegenüber verstehen. Mit dem Baumalter in Verbindung stehende Verschiebungen der Zone maximaler Jahrringbreite, die Fricke aus demnächst zu veröffentlichenden Stammanalysen ableitet, scheinen aber zu lehren, daß dabei noch andere Faktoren in Betracht kommen. Beachtenswert ist bei Buchen eine selbstregulatorische Verkürzung des Stammes durch Absterben der oberen Kronenäste und Bildung einer neuen tiefer gelegenen Krone durch Klebäste im Zusammenhang mit Lichtstellung und vermehrter Windwirkung.

Auch die Querschnittsform der Stämme kann sich ihrem mechanischen Bedürfnis anpassen. Der bei kreisrunder Form zum Wider-

[1]) Nach Kövesi (1906) ist unter gleichbleibenden biologischen Verhältnissen die Rauminhaltszunahme des Baumstammes der dritten Potenz der Zeit proportional.

Lebensjahren

10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	Max.-Höhe
Mittlere Scheitelhöhen des Bestandes in Metern														
1,9	5,6	9,6	12,5	14,7	16,6	18,3	19,9	21,4	22,8	24,0	25,0	25,8	—	35,2
	370	400	290	220	190	170	160	150	140	120	100	80		
—	—	—	18	—	25	—	30	—	—	—		—	—	35,0
—	—	5,7	9,3	13,1	16,2	18,9	21,2	23,2	25,0	26,7	28,2	—	—	35,9
			360	380	310	270	230	200	180	170	150			
—	—	13	17	20	23	26	28,5	30,5	32,0					49,0
			400	300	300	300	200	200	200					
—	1,6	3,5	5,9	9,0	12,2	15,3	18,3	20,8	23,0	24,9	26,5	27,6	28,5	35,2
		190	240	370	320	310	300	250	220	190	160	110	70	
—	—	7,7	10,5	13,1	15,5	17,7	19,5	21,1	22,2	23,2	24,2	25,1	25,9	34,1
			280	260	240	220	180	160	110	100	100	90	80	
—		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	30
—	11,2	14,7	17,1	18,8	20,0	20,8	21,3	—	—	—	—	—	—	25,5
		350	240	170	120	80	50							
—		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	28
—	—	7,7	11,0	14,2	16,9	19,2	21,3	23,2	25,0	26,6	27,8	28,7	29,2	36,8
			330	320	270	230	210	190	180	160	120	90	50	
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	25

die auf bestem Boden beobachteten maximalen durchschnittlichen Bestandeshöhen.

stand gegen Biegungen von beliebigen Seiten her am meisten geeignete Querschnitt kann an Standorten mit einseitiger Windwirkung oval werden, wobei die lange Achse in die Windrichtung zu liegen kommt. Die Unregelmäßigkeiten der Stammbasis, unterhalb 1,30 m, bleiben bei forstlichen Berechnungen außer Betracht. Hier sind, als besondere Verstärkung, oft wulstige Wurzelanläufe vorhanden, die in den tropischen Regenwäldern (vgl. unten S. 12) gewaltige Abmessungen erreichen können. Namentlich bei weichholzigen Bäumen (Ficus, Ceiba pentandra, Sterculia, Alstonia congensis) werden sie zu förmlichen Brettern, die weit am Stamm in die Höhe reichen und Nischen zwischen sich lassen, in denen Menschen sich bequem verbergen können. Die eigentliche Stammwalze verjüngt sich zwischen den Wurzelanläufen nach unten, so daß der Stamm sich in diese förmlich auflöst. Bei dem Kameruner Schirmbaum (Musanga Smithii) ist die Stammbasis durch Nebenwurzeln verstärkt, die bis zu mehreren Metern oberhalb des Bodens aus dem Stamme entspringen und im Bogen herablaufend ihn rings mit Stützen umgeben. Auf einem ganzen Gerüstwerk solcher Stelzwurzeln stehen die bis etwa 20 m hohen Mangroven (Rhizophora mangle u. a.) und Kandelaberbäume (Pandanus) tropischer Uferlandschaften. Es verleiht ihnen Standfestigkeit in schlammigem Boden und hebt den eigentlichen Stamm über die Flutgrenze empor.

In vielen Fällen läßt sich die Form eines Baumstammes nicht aus mechanischen Prinzipien allein verstehen. Der Stamm ist nicht nur Träger der Krone; er dient auch der Leitung und zeitweiligen Aufspeicherung des von der Wurzel gelieferten Bodenwassers und aus den Blättern stammender organischer Stoffe. Wasserspeicher sind z. B. die unförmlich dicken Stämme der Affenbrotbäume (Adansonia digitata) mittelafrikanischer Steppengebiete und der faßförmigen Cavanillesien brasilianischer Dorngebüsche, die bei 20 m Höhe 5 m Durchmesser erreichen. Daß auch die Stämme unserer Bäume Wasser speichern, zeigt sich an Veränderungen ihres Durchmessers, die mit der Wasserverdunstung seitens der Blätter Hand in Hand gehen. Sie folgen den täglichen Schwankungen der Luftfeuchtigkeit, so daß z. B. ein Gewitter eine merkliche Dickenzunahme der Bäume herbeiführen kann (J. Friedrich Centralblatt f. d. ges. Forstwesen Wien 1897).

Manche Eigentümlichkeiten der Form der Palmstämme erklären sich aus dem Verhalten der Gipfelknospe, aus der sie hervorgehen. Wenn diese während des Höhenwachstums immer mehr erstarkt, bekommt der Stamm die Form eines auf die Spitze gestellten Kegels (Chamaerops humilis); schwankt ihre Leistungsfähigkeit, so zeigt der Stamm abwechselnd stärkere und schwächere Partieen (Livistonaallee in Buitenzorg); erleidet sie eine einmalige, vorübergehende Schädigung, wie bei der Oelpalme im Rodungsfeuer westafrikanischer Pflanzungen, so zeigt später der Stamm an der betreffenden Stelle eine Einkerbung.

Daß Baumstämme wie alle anderen Pflanzenteile auch spezifische, nicht weiter aus äußeren Umständen erklärbare Eigentümlichkeiten besitzen, ist selbstverständlich.

Die merkwürdigsten Baumstämme vielleicht sind die der epiphytischen Ficusarten, deren Luftwurzeln, indem sie an zufälligen Berührungsstellen untereinander verwachsen, wie ein Netzwerk den sie tragenden Wirtsstamm umklammern und nach dessen Absterben und Vermodern eine vielfach durchbrochene hohle Säule bilden. Bei Ficus bengalensis L. (Banjan) werden von den weit ausstreichenden Aesten herabhängende Luftwurzeln zu Sekundärstämmen, die den Mutterstamm als kleiner Wald rings umgeben. Die Stämme der Baumfarne zeichnen sich durch eigentümlichen inneren Bau und einen sie ganz umhüllenden Mantel schwarzer Luftwurzeln aus, die in der feuchten Atmosphäre ihrer Standorte ihrer Versorgung mit Wasser und Stickstoffverbindungen dienstbar sein mögen.

3. Bau der Baumkrone. Nach der Beschaffenheit der Krone kann man die Bäume in Schopfbäume und Wipfelbäume einteilen. Die Krone der Schopfbäume besteht aus einem Büschel großer Blätter, der aus der Gipfelknospe eines nicht verzweigten Stammes hervorgeht.

Beispiele bieten die Grasbäume, Dracänen, Schraubenpalmen (Pandanus), Palmen, Baumfarne und Melonenbäume. Ein „falscher" Schopfbaum ist das westafrikanische Canthium glabriflorum Hiern. Der bis 10 m hohe Stamm trägt am Gipfel eine Rosette von Aesten mit kreuzweise gegenständigen Blättern, deren Oberflächen sich durch Drehungen alle horizontal richten, so daß jeder beblätterte Ast einem gefiederten Blatt und der ganze Baum einer Palme gleicht.

Canthium gehört zu den sogenannten Ameisenbäumen, die ständig von Ameisen bewohnt sind, denen sie im Innern der Zweige Wohnung und zum Teil auch Nahrung bieten. Da der Ameisenbesuch den Bäumen nützt, weil er andere Insekten fernhält, hat man angenommen, ihre Eigenheiten seien durch die Ameisen herangezüchtet worden, wie die Eigenheiten der Blumen durch die bestäubenden Insekten. In den meisten Fällen liegt aber eher wohl eine kluge Benutzung einmal vorhandener pflanzlicher Einrichtungen durch die Ameisen vor, die in den Tropen so verbreitet sind und oft auf den Bäumen lebenden Schildläusen nachgehen (A. Schimper Pflanzengeographie Jena 1898; E. Rettig Pflanzenameisen und Ameisenpflanzen Jena 1904).

Uebergänge zu den Wipfelbäumen, d. h. Bäume mit gering verzweigten Kronen, deren Aeste endständige Blattbüschel tragen, sind in den Tropen häufig. Die echten Wipfelbäume entwickeln eine reich gegliederte Krone, deren sämtliche Zweige sich durch

Spitzenwachstum verlängern. Dies Wachstum scheint in günstigen Klimaten jahraus jahrein ohne wesentliche Pause andauern zu können. In den meisten Fällen aber wird es durch Ruheperioden unterbrochen, deren Beginn durch das Auftreten von Ruheknospen bezeichnet ist. Die Bildung einer solchen besteht im einfachsten Falle darin, daß das Wachstum der Sproßspitze aufhört und die sie einhüllenden Blättchen auf einem unentwickelten jugendlichen Zustande verharren, nur ausgezeichnet durch dichtere Behaarung oder harzige Ueberzüge zum Schutze gegen Vertrocknung und Tierfraß. In anderen Fällen bilden Nebenblätter, der Blattgrund oder Blätter besonderer Ausbildung eine eigenartige Knospenhülle, die im immerfeuchten tropischen Regenwald fast stets saftig ist, in Klimaten mit Trockenperioden, zu welch letzteren ein Teil unseres Winters gehört, aus trockenen Schuppen (Knospenschuppen) zu bestehen pflegt. Auch durch Einsenkung in das Rindengewebe (Robinia) oder in die Basis des Blattstiels sind manche Knospen geschützt. Die Ruheperioden sind je nach den Umständen verschieden lang und verschieden stark ausgesprochen. Unsere Bäume haben außer der winterlichen Pause oft eine zweite weniger vollständige und oft nur von unvollkommenem Knospenschluß begleitete Ruhezeit im Hochsommer, deren Ende die Bildung des Johannistriebes anzeigt. In den Tropen fallen die Ruhezeiten mit den einmal oder mehrmals im Jahre eintretenden Trockenzeiten zusammen. Sie fehlen aber auch nicht in sehr gleichmäßigen Klimaten, wo sie von der Dauer weniger Tage sein können und nicht alle Teile der Baumkrone gleichzeitig zu treffen brauchen. Zwar hängt der Eintritt der Ruhezeit direkt oder indirekt von äußeren Umständen ab, doch ist es bisher nicht jederzeit und nicht bei jedem Baum möglich gewesen, durch äußere Einwirkungen die Ruhezeit abzukürzen.

Die Entfaltung des einer Ruheknospe entspringenden Triebes geschieht bei uns im Laufe einiger Wochen, in den Tropen mitunter innerhalb weniger Tage. Anordnung, Anzahl, Längenverhältnisse, Stärke und Richtung der Sprosse bedingen den Charakter des laubtragenden Skeletts, von dem die Tracht des Baumes schließlich abhängt. Zur Rundung der Krone trägt wesentlich bei, daß die Verzweigungsebenen aufeinander folgender Sproßgenerationen sich unter verschiedenen Winkeln kreuzen. In keinem Falle werden am erwachsenen Baume soviel Zweiggenerationen gefunden, wie seinem Alter entsprechen würden.

Eine 100 jährige Eiche müßte z. B. 99 Zweiggenerationen aufweisen, wenn alle Mutter-, Tochter-, Enkelzweige und so fort gesondert erhalten blieben. In Wirklichkeit zählt man aber nur 5 bis 6, an unseren Bäumen überhaupt nie mehr als 8 Generationen und diese Zahl wird meist schon in den ersten 10 Lebensjahren erreicht.

Es erklärt sich dies daraus, daß ein Teil der Aeste, bei den Eichen, Pappeln und Salix fragilis durch freiwillige Ablösung (Absprünge), verloren geht und andere wenigstens in ihren oberen Teilen absterben, während ihre Fußstücke beim Dickenwachstum zu einer einzigen Achse verschmelzen.

Bei der Fichte sind die „Absprünge" durch Eichhörnchen abgebissene Zweigenden.

Der regelmäßige Zweigverlust wird im wesentlichen durch den Kampf der Sprosse um Licht und Wasser herbeigeführt. Die Vermehrung der Sprosse einer Baumkrone schreitet nur so lange fort, bis ein für jede Holzart innerhalb gewisser Grenzen konstantes Minimum an Licht im Innern der Krone erreicht ist. Von der durch dieses Minimum gegebenen Grenze ab hat jede Neubildung von Zweigen ein Absterben anderer zur Folge. Auch das Austreiben der Knospen selbst kann durch Lichtmangel gehemmt werden; andererseits treiben die Knospen der Buchen an schattigeren Standorten früher aus als an hellen (Arnold Engler l. c.). Wie unumgänglich notwendig die Sproßreduktion für den Baum ist, mag daraus erkannt werden, daß ein 10 jähriger Birkenast, der an jedem Sprosse nur 2 Seitentriebe alljährlich erzeugt, 19 683 Laubsprosse in 9 Sproßgenerationen besitzen müßte. In Wirklichkeit zählt man (Wiesner) an einem gut beleuchteten Aste des genannten Alters nur 238, an einem stark beschatteten 182 Zweige und nur 5 Generationen. Unter den Tochtersprossen eines Jahrestriebs ist der Gipfelsproß in der Regel der kräftigste. Auch die nächstunteren Seitensprosse werden noch zu kräftigen Trieben, dann aber nimmt nach der Basis des Mutterzweigs hin die Länge der Tochtersprosse ab und die untersten Knospen treiben unter normalen Verhältnissen überhaupt nicht aus, sondern „schlafen" oft jahrelang bis eine Verletzung der über ihnen stehenden Sproßteile sie zur Entfaltung anregt. Die kurzen unteren Seitensprosse eines Jahrestriebs werden als Kurztriebe oder Stauchlinge bezeichnet, namentlich wenn ihr Verhalten von dem der Langtriebe scharf unterschieden ist.

Bei Fagus silvatica können die Kurztriebe aus ihrer jedesmaligen Endknospe jahrelang neue Kurztriebe erzeugen, die ohne sich zu verzweigen jedes Jahr eine Blattrosette bilden. Auf diese Weise werden sie zu Trägern des Blattkleides an mehrjährigen Aesten der Baumkrone, wo es

ohne die langlebigen Kurztriebe keiner jährlichen Erneuerung fähig wäre. Die dicken Kurztriebe der Lärche erzeugen 4 bis 6 Jahre lang Nadelbüschel und können, gleich denen der Buche, zu Langtrieben auswachsen.

Bei der Kiefer sind Kurztriebe ohne jede Längenentwickelung die Träger der gesamten Benadelung. Die Langtriebe, die hier nur aus den Gipfelknospen und einem dicht unter ihnen befindlichen Knospenkranz hervorgehen, tragen mit Ausnahme der Keimlingsachse des ersten und zweiten Jahres als Blattgebilde nur unbedeutende Schuppen, in deren Achseln die benadelten Kurztriebe sich finden.

Sehr häufig ist die Blütenbildung der Bäume an Kurztriebe geknüpft und Kurztriebe sind es, die bei dem wilden Birnbaum (Pirus communis) verdornen und so zu einem Wehrsystem sich ausbilden. Die Dornen des Kreuzdorn sind Langtriebenden, die der Robinie Nebenblätter.

Das zahlenmäßige Verhältnis zwischen Kurztrieben und Langtrieben ändert sich mit dem Lebensalter des Baumes. In der Jugend herrscht die Bildung kräftiger Langtriebe vor, später nehmen Länge und Stärke der Langtriebe ab und die Zahl der Kurztriebe wächst. Die Baumkrone erscheint dann voller und mehr gerundet. Sie hat sich „abgewölbt". Gleichzeitig geht mit einer immer sich steigernden Bildung von Blüten der Baum dem Höhepunkt seiner sexuellen Tätigkeit entgegen, auf dem er oft lange Zeit verharrt (Vöchting).

Die Richtung, die die Aeste und Zweige einer Baumkrone einnehmen, hängt von einem verwickelten Spiel verschiedener Kräfte ab, das im Einzelnen noch nicht völlig klar gelegt ist. Zunächst hat jede Baumart ihre spezifischen Eigentümlichkeiten, dann ist die Richtung eines jeden Zweiges durch seine Beziehungen zu den übrigen Gliedern der Krone bestimmt; ferner kommen geotropische und heliotropische Reizwirkungen und endlich auch das Gewicht der Zweige und ihrer Laubmassen in Betracht. Eine bei warmem Wetter zurückgehende Senkung von Baumzweigen kann durch Kälte hervorgerufen werden. Das Hängen der Aeste der Trauerbäume beruht meist darauf, daß das Gewicht der zarten Astenden deren negativen Geotropismus nicht zur Geltung kommen läßt. Die älteren stärkeren Teile der Aeste richten sich auf.

Vöchting, der diese Erscheinungen näher studiert hat, gibt auch eine Uebersicht über die Aenderungen in der Entwickelung eines Zweigsystems, die infolge der gegenseitigen Abhängigkeit seiner Glieder durch das Beschneiden seitens der Obstbaumzüchter hervorgerufen werden. Das Auftreten von Langtrieben an Stelle von Kurzsprossen, das Erwachen schlafender Augen, das Auftreten von Zukömmlingen (Adventivsprossen), endlich Zweigkrümmungen infolge der Last der schweren Früchte tragen dazu bei, die Krone eines älteren Obstbaumes weniger übersichtlich zu machen, als es die Kronen der Waldbäume sind.

Das Gesamtbild der Krone eines Naturbaumes hängt sehr von äußeren Umständen ab, hat aber auch eigene Züge. Die aus mehr gerundeten Teilen zusammengesetzte Krone der Eiche unterscheidet sich auf den ersten Blick von der der Buche, die aus lauter übereinander geschichteten spitz zulaufenden Zweigsystemen besteht. Die Wollbäume (Ceiba pentandra) auf Java, nicht aber in Westafrika, die Terminalien der Alleen in Lome und Duala, sind durch etagenartig gegliederte Kronen ausgezeichnet, Mimusops djave, der Kameruner Mahagonybaum, durch eine Kandelaberkrone, die Akazien unserer afrikanischen Steppengebiete durch tischartig flache Kronen, über die der trocknende Wind ohne Schaden hinstreicht, die aber auch in immerfeuchten Tropengebieten vorkommen. Wesentlich auf den Eigenschaften der Krone beruht das „Spreitungsvermögen" der Bäume, d. h. ihre Fähigkeit, in einheitlichem Bestand Schwesterbäume zu unterdrücken. Es ist bei Buche und Eiche groß, bei der Fichte klein und bewirkt, daß die erstgenannten Holzarten auf gegebenem Raum relativ wenige aber starke Stämme erzeugen, während in Fichtenkulturen eine große Anzahl mittelguter Stämme nebeneinander aufwächst, zwischen denen der Forstmann mittels seiner Durchforstungen erst für die aussichtsreichen Zukunftsstämme Platz schaffen muß (Hauch Allg. Forst- und Jagdztg. 1905).

4. Das Blattkleid. Das Blattkleid der Wipfelbäume setzt sich entweder aus relativ wenigen großen, kräftigen Aesten angehefteten, oder aus sehr zahlreichen kleinen Blättern zusammen, welch letztere bei der Birke z. B. an entsprechend dünnen Tragzweigen sitzen, bei den Nadelhölzern dicke und wenig verzweigte Sprosse dicht bekleiden. Große Blätter sind fast stets fingerig, fiederig oder lappig zerteilt, so daß sie sich gegenseitig nicht zu sehr beschatten und die Transpiration ungehindert vor sich gehen kann.

Rein physiognomisch lassen sich unter den Wipfelbäumen nach dem Laub folgende Typen unterscheiden: 1. Nadelhölzer; 2. Lorbeerform. Starre, immergrüne, meist glänzende, ungeteilte, breite Blätter; 3. Olivenform. Starre, immergrüne, ungeteilte, schmale Blätter; 4. Buchenform. Jahrzeitlich grüne, einfache, nicht starre Blätter verschiedener Größe; 5. Eschenform. Blätter einmal gefiedert oder gefingert. Die Teilblättchen ziemlich groß; 6. Mimosenform. Blätter doppelt gefiedert. Teilblättchen meist sehr zahlreich und klein; 7. Casuarinen- und Cypressenform. Laub schuppig oder fast fehlend.

Die Anordnung der Blätter ist durch ihre gesetzmäßige Entstehungsfolge am Vegetationspunkt bedingt; ihre Lage in erster Linie durch das Licht. Die meisten stellen sich während ihrer Entfaltung ein für allemal so ein, daß das hellste zerstreute Licht des Standorts ihre Fläche möglichst senkrecht trifft (fixe Lichtlage). Andere sind durch Gelenke befähigt, ihre Lichtlage zu verändern (Robinia, Sterculia u. a.).

Die Lebensdauer der Baumblätter ist entweder auf einen Sommer oder eine Regenzeit beschränkt oder sie erstreckt sich über mehrere Vegetationsperioden. Die Nadeln unserer Kiefern werden z. B. 5 bis 9 Jahre alt. In jenem Fall nennt man sie sommergrün oder regengrün, in diesem immergrün. Sommer- oder regengrünes Laub findet sich namentlich in Gegenden mit klimatisch stark verschiedenen Jahreszeiten, immergrünes mehr in gleichmäßigen Klimaten. Dieser Unterschied ist indessen keineswegs durchgreifend. Unter den 280 in Ceylon endemischen Baumarten werfen 17 jahreszeitlich ihr Laub ab und weitere 78 laubwerfende Arten hat die Insel mit Indien und dem malayischen Archipel gemeinsam. Jahreszeitliches Laub wird in unserem Klima meist rasch und vollständig abgeworfen, während der schließliche Abfall immergrüner Blätter sich lange hinziehen kann, in der Hauptsache aber auch in einer bestimmten Periode, bei der Kiefer im September und Oktober, stattfindet. In den Tropen tritt der Fall auch kurzlebiger Blätter nicht immer in der ganzen Krone zugleich ein. Obwohl äußere Umstände, wie Trockenheit, zu tiefe Beschattung (Wiesners Sommerlaubfall) und allerlei Schädigungen (Hitzelaubfall) Laubfall hervorrufen oder den Zeitpunkt seines Eintritts beeinflussen können, ist er doch, wie das Abfallen der Blumenblätter und reifer Früchte, im wesentlichen ein normaler Lebensvorgang, der wie viele periodische Lebenserscheinungen zu gegebener Zeit aus noch ungenau bekannten Gründen eintritt. Gefiederte und gefingerte Blätter zerfallen beim Abfall oft in ihre Teile, einfache Blätter lösen sich als Ganzes ab. Meist bildet sich an der Ansatzstelle des Blattstiels, manchmal schon längere Zeit vor dem Abfallen selbst, eine bestimmte Gewebsschicht als Trennungsschicht aus, deren Zellen, ohne zu zerreißen, sich voneinander lösen, so daß das Blatt zuletzt nur noch durch die Gefäßbündel mit dem Sproß zusammenhängt. Diese letzte Verbindung löst der Wind oder sie zerreißt durch Eisbildung an der kritischen Stelle beim ersten Frost. Die Blattnarbe wird durch vertrocknendes Gewebe oder durch Korkschichten geschlossen, die ebenfalls schon lange vorher angelegt sein können. Wenn die Bildung der Trennungsschicht unterbleibt oder verspätet eintritt, so vertrocknen die abgestorbenen Blätter am Zweig. Vor dem Laubfall findet eine teilweise Auswanderung der in den Blättern enthaltenen Aschenbestandteile in die Zweige statt.

Daran beteiligt sich das in den grünen Bestandteilen des Chlorophylls enthaltene Magnesium und hiermit steht vielleicht die herbstliche Verfärbung des Laubes im Zusammenhang (Stahl 1909). Andere Farbenänderungen des Baumlaubes vollziehen sich während seiner Entwickelung und zielen zum Teil auf Bewahrung der Chlorophyllkörner vor zu starker Sonnenwirkung ab. Junges Laub kann, namentlich auffällig in den Tropen, gelb, rot, violett, grau und selbst weiß gefärbt sein und auch das spätere Grün ändert seine Nuance.

Jahreszeitlicher Blattfall bewahrt den Baum vor zu starker Transpiration in Zeiten mangelhafter Wasserzufuhr, wie sie in den Tropen aus dem Auftreten langer Trockenzeiten, bei uns aus dem winterlichen Bodenfrost in Verbindung mit trocknender Wind- und Sonnenwirkung sich ergibt.

Nach ihrem Verhalten in der Wasserwirtschaft der Pflanze unterscheidet man xerophile und hygrophile Baumblätter. Jene (Nadelhölzer, Olivenform) zeigen eine Reihe von Einrichtungen, die auf Einschränkung der Wasserverdunstung hinauslaufen: Reduktion der Oberfläche und der luftführenden Interzellularen, windstille Räume über den Spaltöffnungen, die eingesenkt oder durch ein Haarkleid bedeckt werden, dicke, cutinreiche und mit Wachs überzogene Außenwände der Epidermiszellen, endlich wasserspeichernde Gewebemassen im Blattinneren. Die Gesamtblattfläche eines Nadelbaums kann größer sein als die eines Laubbaums. Die xerophile Struktur der Einzelnadel und der Bau des Holzes ermöglichen indessen im Notfall eine große Einschränkung der Transpiration (s. u. und P. Groom, Oecol. of Coniferae. Ann. of Bot. 24 1910). Hygrophiles Laub (Lorbeertypus, Buchen- und Eschenform) zeigt möglichste Ausbreitung der transpirierenden Oberfläche, oberflächlich gelegene Spaltöffnungen, Reichtum an Interzellularen und zuweilen an den Blattzähnen Drüsen zur Ausscheidung überschüssigen Wassers in flüssiger Form. Oft sind immergrüne hygrophile Blätter unbenetzbar (Wiesner „ombrophob") und eine schief ausgezogene Blattspitze (Träufelspitze) bewirkt ein rasches Ablaufen des Regenwassers, das anderenfalls Gelegenheit zur Ansiedelung störender Kryptogamen auf der Blattfläche bieten würde. Manche Einrichtung zur Herabsetzung übermäßiger Erwärmung des Chlorophylls, wenn auch nur für wenige Stunden, wie eine stark

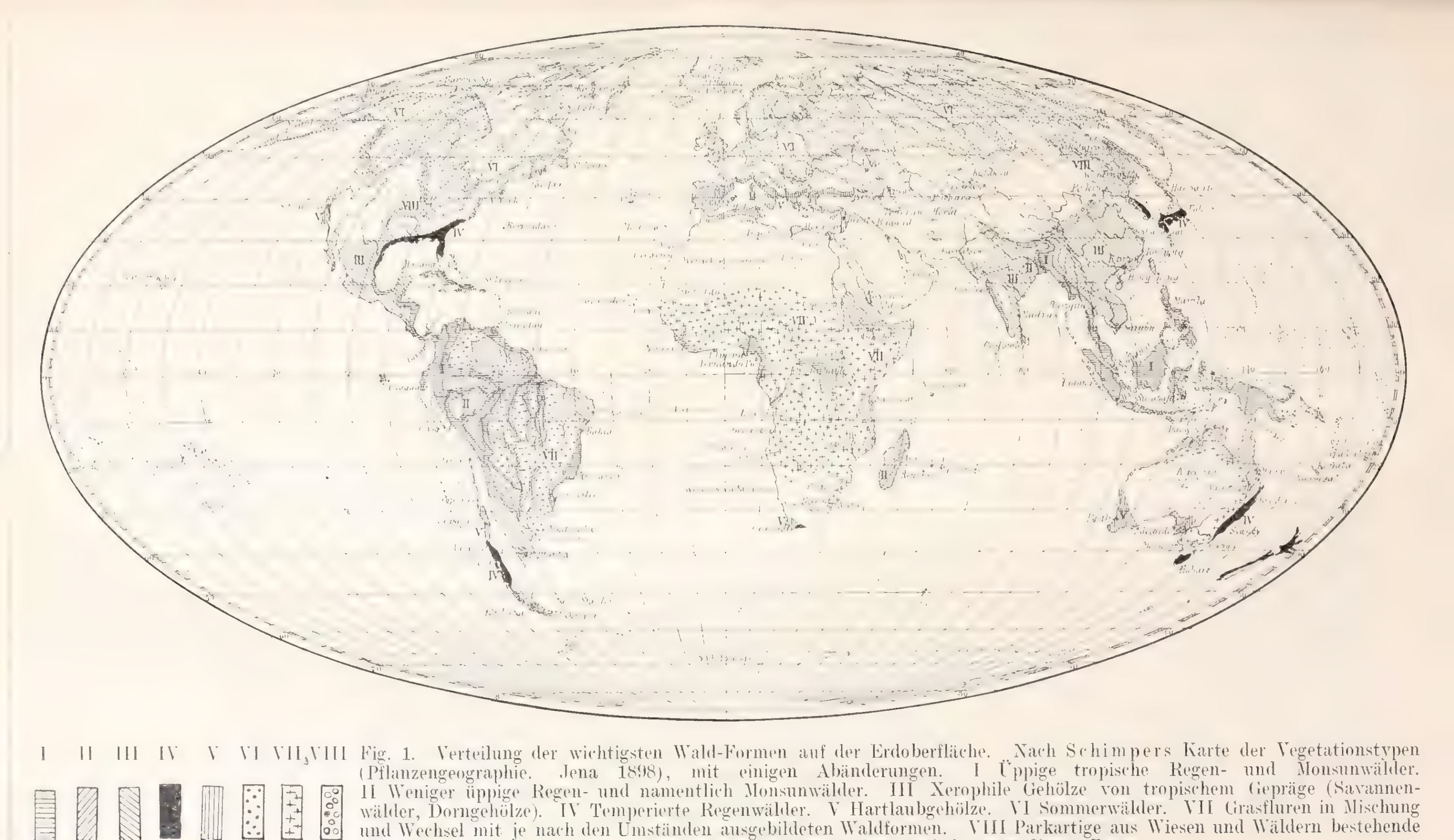


Fig. 1. Verteilung der wichtigsten Wald-Formen auf der Erdoberfläche. Nach Schimpers Karte der Vegetationstypen (Pflanzengeographie. Jena 1898), mit einigen Abänderungen. I Üppige tropische Regen- und Monsunwälder. II Weniger üppige Regen- und namentlich Monsunwälder. III Xerophile Gehölze von tropischem Gepräge (Savannenwälder, Dorngehölze). IV Temperierte Regenwälder. V Hartlaubgehölze. VI Sommerwälder. VII Grasfluren in Mischung und Wechsel mit je nach den Umständen ausgebildeten Waldformen. VIII Parkartige aus Wiesen und Wäldern bestehende Landschaften im winterkalten Teil der gemäßigten Zonen.

reflektierende Oberfläche, haben xerophile und tropische hygrophile Baumblätter gemeinsam. Blätter besonnter und beschatteter Zweige zeigen anatomische Unterschiede (Sonnen- und Schattenblätter), die, einmal vorhanden, sich schon in den Knospen ausprägen (Literatur bei Arnold Engler l. c.).

5. **Die Baumwurzel.** Das Wurzelwerk der Bäume hat das Ganze mit Wasser und mineralischen Nährstoffen zu versorgen, seine sturmfeste Verankerung im Boden zu bewirken und zeitweise auch an der Aufspeicherung von Reservenährstoffen teilzunehmen.

Nach seiner Tracht unterscheidet man gewöhnlich Pfahlwurzeln mit einer tief in den Boden hinabsteigenden Hauptachse (Eiche, Tanne, Kiefer), Herzwurzeln mit mehreren gleichwertigen absteigenden Aesten (Buche) und Flachwurzeln (Fichte), die nicht in die Tiefe dringen. Indessen ist namentlich bei Pfahl- und Herzwurzeln eine weitgehende Anpassungsfähigkeit an die Natur des Bodens vorhanden. Bäume, die in der Jugend eine Pfahlwurzel bilden, können später ein ganz flaches Wurzelsystem besitzen. Die sogenannten Saugwürzelchen sind die letzten Auszweigungen der stärkeren Wurzeln oder adventiv an älteren Wurzelästen entstandene Faserbüschel. Bei den Cupuliferen sehr dünn und fein verzweigt und zu intensiver Durchsetzung kleinster Bodenpartikel geschickt, sind sie z. B. bei der Esche (Oleaceen) relativ dicker und länger, aber weniger reich verzweigt und mehr auf die extensive Wasserwirtschaft des Baumes eingerichtet. In der Regel entwickeln sie sich am reichlichsten in den oberen humusreichen Schichten des Waldbodens oder anderem der Ernährung günstigem Obergrund. Ist dieser, wie in jungen Kiefern- oder Fichtenbeständen auf Heideboden oder altem Ackerland, raschem Wechsel zwischen Nässe und starker Austrocknung ausgesetzt, so kann dies zu schweren Störungen des Wurzellebens Anlaß geben. Ueber die bei unseren Coniferen und Cupuliferen u. a. gewöhnliche Verpilzung der Wurzeln s. u. Mykorrhiza.

6. **Blühen und Fruchten** der Bäume vollzieht sich in der allerverschiedensten Weise. Viele sind Windblütler, die meisten aber wohl insektenblütig. Kleine, oft eingeschlechtige Blüten, die durch ihre Zahl auffallen, sind häufiger als große; doch finden sich bei Bäumen, von den Rafflesien und Aroideen abgesehen, wohl die größten Blüten des Pflanzenreichs (Fagraea). Baumkronen mit großen bunten oder weißen Blumen sind indessen im Gesamtbild des Waldes auch in den Tropen vereinzelte Erscheinungen. Dem blühbaren Alter geht ziemlich allgemein ein mehrjähriges rein vegetatives Wachsen vorher und zwischen zwei Blütenperioden liegen meist vegetative Zwischenzeiten von freilich sehr verschiedener Länge, die teils auf unbekannten Ursachen teils auf äußeren Umständen beruhen und nicht immer künstlich abgekürzt werden können.

Die Hainbuche blüht fast alljährlich reichlich, die Rotbuche bringt bei uns nur etwa alle 7 Jahre, reichlich nur alle 8 bis 12 Jahre Mast. Freistehende Bäume blühen häufiger und früher als Bäume im Bestand, auch zeigen sich namentlich an offenen sonnigen Standorten Arten mit anscheinend sehr langer Blütezeit (Rhizophora, Hibiscus).

Tropische Arten, die angeblich ununterbrochen blühen, scheinen solche zu sein, bei denen die Blütezeiten der einzelnen Individuen nicht zusammenfallen, so daß der Reisende an einem oder dem anderen Exemplar stets Blüten findet. Der Wechsel zwischen vegetativer und fruktifikativer Tätigkeit kann sich auch an einzelnen Zweigen oder kleineren Zweigsystemen höherer Ordnung vollziehen. Ob aber ein und derselbe Zweig ununterbrochen blüht und fruchtet ist zweifelhaft. In den Tropen blühen die Holzgewächse meist während oder unmittelbar nach der Trockenzeit, selten in der Regenzeit (auf Java etwa 8 %). Dies entspricht dem Verhalten unserer Bäume, die zum größten Teil bald nach der winterlichen Ruheperiode ihre Blüten entfalten, die schon vor dieser fast fertig ausgebildet worden sein können (Hasel, Buche). Der Ort der Blütenbildung ist bei manchen Schopfbäumen die Gipfelknospe, die bei manchen Palmen (Corypha) einen mächtigen endständigen Blütenstand hervorbringt. Bei der Lärche entstehen die Blüten, wie bei vielen Laubbäumen an den Kurztrieben. Bei der Kiefer ersetzen die männlichen Blüten Kurztriebe, die weiblichen aber treten an Stelle von Langtriebknospen auf. Nicht allzu selten ist bei tropischen Bäumen Cauliflorie, d. h. die Blüten brechen aus schlafenden Knospen an älteren Aesten oder dem Stamme hervor (Theobroma Cacao). Die Früchte der Bäume sind ebenso mannigfaltig wie die Blüten und den verschiedensten Verbreitungsmitteln angepaßt, die oft nur in der Heimat der Bäume richtig beurteilt werden können. Die Ausbreitung mancher Bäume geschieht durch Randverjüngung, d. h. durch Eroberung neuen Geländes vom Rande des alten Bestandes aus; so z. B. bei den Mangroven und bei unseren Buchen und Eichen, deren Samen indessen ihres Nährstoffreichtums wegen von Vögeln gesucht und gelegentlich weit verschleppt werden. Die kleinsten aller Baumsamen haben vielleicht unsere Pappeln und Weiden, die größten Früchte dürften die kürbisgroßen Sammelfrüchte der Treculia Africana und die Steinfrüchte der Lo-

doicea Seychellarum sein. Manche Baumsamen (Pappeln, Weiden) sind unmittelbar nach dem Abfall keimfähig und bewahren die Keimfähigkeit nur wenige Wochen; andere ruhen längere Zeit, Taxus und Hainbuche selbst 2 Jahre.

7. Anatomisches (vgl. auch den Artikel „Nutzhölzer"). Der Holzkörper der Bäume sichert vermittels der kräftigen Wände seiner toten Elemente, der dickwandigen einfach getüpfelten Fasern, der mit Hoftüpfeln versehenen Tracheiden und der Gefäße, seine Trag- und Biegungsfestigkeit; die weitlichtigen Tracheiden und Gefäße, von denen die letztgenannten den Nadelhölzern fehlen, sind zugleich die Wege für die Wasserleitung von den Wurzeln zu den Verbrauchsstellen. Lebende Holzelemente, die Markstrahlen und das Holzparenchym, geben Gelegenheit zur Aufspeicherung von Reservestoffen wie Stärke und fettes Oel. Das meist unbedeutende Mark der Bäume stirbt sehr frühzeitig ab und auch im Innern des Holzkörpers älterer Stämme pflegt alles Leben erloschen zu sein. Man nennt die toten Holzteile Kernholz, wenn sie sich durch die Färbung von den äußeren lebenden Holzteilen, dem Splint, unterscheiden, (Eiche, Ulme, Robinie, Kiefer), anderenfalls Reifholz (Fichte, Tanne, Ahorn). Bei Buche und Linde findet sich nicht selten ein brauner falscher Kern, dessen Bildung durch Wundinfektion hervorgerufen worden ist. Reifholz und Kern beteiligen sich nicht mehr an den physiologischen Vorgängen im Baumstamm; doch scheint das in der Regel wasserarme Reifholz der Buche gelegentlich als Wasserspeicher benutzt zu werden.

Der Wasserverbrauch der Bäume setzt sich aus den zur Bildung ihrer Substanz verwandten und den durch die Blätter ausgedunsteten Wassermengen zusammen. Die letzteren überwiegen so sehr und sind so bedeutend, daß von ihnen das Leben des Baumes in hohem Grade abhängt.

Der Wasserverbrauch unserer Nadelbäume verhält sich zu dem unserer Laubbäume bei reichlicher Wasserversorgung wie 1: 6, sonst wie 1:10, d. h. jene können ihren Verbrauch mehr einschränken als diese. Erwachsene Buchen verbrauchen im Durchschnitt der Vegetationsperiode täglich je nach ihrer Größe 10 bis 50 kg Wasser, Eschen und Robinien noch mehr.

Sehr viel ist die Frage nach den Kräften oder nach der Art der Arbeitsleistung, welche das Wasser im Baumstamm in die Höhe schafft, erörtert worden, ohne daß eine befriedigende Lösung des Problems bis heute erreicht wäre.

Wir wissen nur, daß das Wasser im Holzkörper und zwar im Innenraum der Gefäße und Tracheiden sich bewegt und daß auf rein mechanische Weise, wobei die Kohäsion des Wassers eine Rolle spielt, im frisch getöteten Baumstamm eine kurze Zeitlang Wasser bis über die Höhe einer vom Luftdruck getragenen Wassersäule (10 m) aufsteigen kann. Jedenfalls aber ist, um die Leitung im Gang zu halten und vielleicht auch zur Lieferung genügend großer Wassermengen die Mitwirkung der lebenden Zellen, der Markstrahlen und des Holzparenchyms unentbehrlich, die überall im Baumstamm mit den Wasserbahnen in Berührung sind.

Die Außenrinde schützt das Bauminnere gegen Trocknis, zu starke Erwärmung durch direkte Sonnenstrahlen und gegen Spätfröste zu einer Zeit, in der seine lebenden Elemente nicht mehr kältefest sind. Im Schatten eines Bestandes erwachsene glatte Rinden passen sich bei plötzlicher Freistellung oft den geänderten Verhältnissen nicht sofort an und erliegen dem Sonnenbrand.

Die genannten Leistungen werden durch Korkschichten ausgeführt, die bei glatten Rinden (Buche) den ganzen Stamm mit einer dünnen Haut überziehen, die sich von innen her erneuert, bei borkigen (Eiche) auch im Innern der Rinde entstehen und dabei lebendes Gewebe abschneiden, das vertrocknet und mit ihnen die schützenden Borkeschuppen bildet. Kleine hellfarbige Höckerchen, die später zu größeren Warzen und Rissen werden, enthalten die Mündungen der Zwischenzellräume, welche das Bauminnere mit Atemluft versorgen (Lenticellen).

Die Innenrinde enthält die der Stoffwanderung in der Rinde dienenden lebenden Elemente, namentlich die Siebröhren. Steinzellen, Bastfasern, Kristalle von Calciumoxalat, Harze, Milchsäfte (Kautschuk), Alkaloide, Gerbstoffe tragen zur Erhaltung der Rinde bei, indem sie diese gegen tierische Angriffe schützen oder die Heilung von Wunden erleichtern. Die Blitzsicherheit mancher glattrindigen Bäume (Buche, Hainbuche) führt Stahl u. a. auf die Benetzbarkeit ihrer Rinde zurück, die das Zustandekommen einer elektrischen Ladung erschwert.

Dickenwachstum. Zwischen Rinde und Holz liegen die Zellschichten, von denen das Dickenwachstum des Baumstammes ausgeht. Sie werden Cambium genannt und bestehen aus etwas in der Längsrichtung des Baumes gestreckten Zellen, die im Winter ruhen, in Deutschland aber in der zweiten April- bis ersten Maihälfte sich auszudehnen beginnen und sowohl nach der Rinde wie nach dem Holzkörper hin durch geeignete Teilungen neue Zellen erzeugen. Während diese den Charakter fertiger Holz- und Rindenelemente annehmen, bleiben inmitten des Cambiums immer einige Zellschichten in teilungsfähigem Zustand. Da ein nachträgliches Längenwachstum des ganzen Baumstammes, dessen größter Teil aus toten Holzelementen besteht, ausgeschlossen ist, müssen die aus den Cambium-

zellen unter starker Längsstreckung hervorgehenden Holzfasern und Tracheiden sich mit den Enden zwischen einander schieben. Vom Verlauf dieses gleitenden Wachstums hängt es ab, ob das Holz geradfaserig oder drehwüchsig wird.

Das Cambium der Dikotylen und Nadelhölzer bildet sich zwischen Siebteil und Gefäßteil der Gefäßbündel und überbrückt die sie trennenden Markstrahlen. Periodische Aenderungen in der Tätigkeit des Cambiums führen zur Ausbildung der ringförmigen Zeichnungen auf dem Stammquerschnitt, die man *Jahresringe* nennt und die in unserem Klima meist auch wirklich den Holzzuwachs je eines Jahres umfassen, obwohl Unterbrechung der Cambiumtätigkeit durch Spätfrost, neue Anregung in Verbindung mit der Johannistriebbildung Ringzeichnung innerhalb des Jahresrings hervorrufen können. In den Tropen können mit dem Wechsel zwischen Regen- und Trockenzeiten mehrere Ringe im Jahr auftreten (Semesterringe), die sich oft kaum zählen und auf Jahre verteilen lassen. Ringzeichnungen finden sich auch bei Bäumen gleichmäßiger Klimate und europäische Bäume können dort die Ringbildung beibehalten, so daß diese nicht als direkte Folge der Einwirkung äußerer Umstände anzusehen ist. Auch haben alle Versuche, sie aus Aenderungen der Druckverhältnisse im Baum während des Dickenwachstums oder aus jahreszeitlichen Schwankungen der Ernährung und Wasserversorgung des Cambiums direkt abzuleiten versagt, obwohl ein Einfluß der letzteren auf die Gestalt der Holzelemente beobachtet ist. Die Ringzeichnung kommt durch einen plötzlichen Wechsel zwischen Schichten engerer und weiterer Holzelemente zustande, von denen jene beim Nachlassen (Herbstholz, besser Spätholz), diese beim Neubeginn (Frühlingsholz, besser Frühholz) der Cambiumtätigkeit gebildet werden (vgl. den Artikel „*Nutzhölzer*"). Das Cambium erwacht in den jüngsten Sprossen zuerst, und schließt seine Arbeit im Stamm spätestens in der ersten Septemberhälfte ab, während sie in den Wurzeln weiter dauern kann. Die Breite der Jahresringe hängt so sehr von den ganzen Lebensverhältnissen des Baumes ab, daß der Forstmann daraus die Geschichte eines Bestandes mit seinen Durchforstungen, etwaigem Maikäferfraß usw. ablesen kann. Andererseits ist sie auch von der spezifischen Wachstumsenergie der Baumarten abhängig (über exzentrischen Wuchs siehe u. a. R. *Hartig*, Holzuntersuchungen Berlin 1901. In der vom Cambium her sich bildenden Innenrinde ist ebenfalls Schichtenbildung vorhanden, die aber bei der geringen Größe ihres jährlichen Zuwachses schwer erkennbar bleibt. Das Dickenwachstum der *monokotylen Bäume* weicht von dem beschriebenen Typus ab. Soweit es nicht durch Erstarkung der Endknospe geschieht, bilden auch sie ein Cambium, von dessen Produkten es abhängt, ob sie festes Holz oder einen aus nur durch lockeres Zwischengewebe verbundenen Gefäßbündeln bestehenden Holzkörper besitzen.

Die *Baustoffe* für sein Dickenwachstum fließen dem Baumstamme aus den Blättern zu und wandern im wesentlichen in der Innenrinde abwärts, um von da aus dem Cambium und über das Cambium hinaus den Markstrahlen und dem Holzparenchym zugeführt zu werden oder in die Wurzeln zu gelangen. Im Oktober sind gewöhnlich alle lebenden Zellen des Baumstammes mit Stärke angefüllt, die den Winter über ruhig liegen bleibt oder während der kalten Zeit aus dem Holzkörper wenigstens verschwindet, um im Frühjahr wieder zu erscheinen, bis sie von neuem gelöst mit dem im Holz aufsteigenden Wasserstrom den sich entfaltenden Knospen zuwandert. Jenes Verhalten zeigen z. B. Esche und Eiche („*Stärkebäume*"), dieses die Coniferen und andere weiche Hölzer, die wegen des Fettgehaltes, der zur Zeit des Verschwindens der Stärke in ihrem Holze beobachtet wurde, *Fettbäume* genannt worden sind.

Die verschwindende Stärke wird wie bei dem Süßwerden der Kartoffeln unter dem Einfluß der niederen Temperatur zu Zucker, dessen Anhäufung die schädlichen Wirkungen der Kälte hemmt. Bei der Buche bleibt der Gehalt des Holzes an Fett und Eiweißstoffen während des ganzen Winters derselbe, während der Zuckergehalt unter gleichzeitiger Verminderung der Stärke mit der sinkenden Temperatur steigt.

Untenstehende Tabelle enthält die in 1,30 m Höhe bestimmten mittleren *Durchmesser* einiger Waldbäume in verschiedenen Lebensaltern auf mittelgutem Standort in Zentimetern:

Alter	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Kiefer	7	11	14,5	18	21	24	26	28	30	31
Edeltanne	7	11	15	19	23,5	28	34,5	40,5	46,5	53
Fichte	6	10	14	17	20,5	23	25,5	28	30	32
Buche	5	8	11	14	16,5	18,5	21	23	25	27
Schwarzerle	14	18	20,5	22,5	23,5	24				

Folgende Zahlen sollen zeigen, welchen Umfang Bäume überhaupt erreichen können: Adansonia digitata, afrikanischer Affenbrotbaum 34 m, angeblich selbst 45 m, mehr als 15 m sind aber Ausnahme; Taxodium sempervirens bei Oaxaca 33 m, vielleicht aus 3 Bäumen verwachsen; Sequoia gigantea in Kalifornien in 2 m Höhe 21 m; Tilia (grandifolia?) zu Staffelstein in 1,30 m Höhe 17 m; Quercus (pedunculata?) bei Wetherby 1842 in 1,25 m Höhe 11,75 m, 1908 12,45 m.

Alter. Bei Altersschätzungen der Bäume ist der Wechsel der Jahresringbreite mit dem Standort und mit dem Alter zu beachten. In der Jugend werden erheblich breitere Ringe als später gebildet. Ferner täuschen, z. B. beim Taxus, verwachsene Stämme. Bei Sequoia gigantea wurden 1350 Jahresringe gezählt und Mayr schätzt einen von ihm gemessenen Baum auf 4250 Jahre. Auch das Vorkommen 1000-jähriger Eichen ist wahrscheinlich gemacht.

Tod. Der natürliche Tod der Bäume würde in einem Aufhören aller Neubildungen und dem Absterben der in bleibenden Ruhezustand eingetretenen Zellen des Cambiums und der Vegetationspunkte sowie aller anderen lebenden Elemente bestehen. Es ist durchaus möglich, daß dieser Zustand bei langlebigen Bäumen „von selbst" niemals eintritt. Cambiumzellen, die nachweislich mehr als 1000 Jahre tätig waren, könnten sehr wohl in demselben Sinne unsterblich sein, wie Protozoen oder Bakterien, die sich unbegrenzt durch Zweiteilung fortpflanzen. Das tatsächliche Absterben der Bäume beginnt gewöhnlich mit der Verderbnis des Stamminnern und Reduktion der Krone. Die Ruine fällt dann dem Sturm oder dem Menschen zum Opfer. Der zeitliche Beginn der Zerstörung hängt von den Lebensverhältnissen und auch von der spezifischen Natur der Bäume ab, deren Lebenszähigkeit und Widerstandskraft gegen die Einflüsse der Umgebung sehr verschieden ist.

8. Natürliches Vorkommen der Bäume. Das Auftreten baumförmiger Pflanzen in der Natur hängt von bestimmten klimatischen Bedingungen ab, die sich aus ihrer Eigenart ergeben. Der größeren Erhebung über den Boden wegen ist der Baum der austrocknenden und auch der mechanischen Wirkung des Windes mehr ausgesetzt als Strauch und Kraut. Sowohl im hohen Norden als auch im Hochgebirge ist es daher in erster Linie die trocknende Wirkung der bewegten Luft, dort durch die Kälte begünstigt, hier durch den geringen Luftdruck, die dem Baumleben ein Ende setzt. Andererseits macht ein tiefgehendes großes Wurzelsystem, dem tiefliegende Wasservorräte zugänglich sind, den Baum von der Verteilung der atmosphärischen Niederschläge unabhängig, wofern nur zu irgendeiner Zeit die unterirdischen Wasserreservoire aufgefüllt werden. Es gibt Waldgebiete mit langen Trockenperioden und solche mit Regen zu allen Jahreszeiten.

Wälder (s. Fig. 1). Die Möglichkeit, in enger Vergesellschaftung zu wachsen, d. h. Wälder zu bilden, wird den Bäumen dadurch gegeben, daß ihre Abfälle durch das Tierleben und die Verwesungsorganismen des Bodens so verarbeitet werden, daß sich dieser in einem für das Wurzelleben und das Aufkommen des Nachwuchses günstigen Zustande erhält. Dieser Umstand ist auch für das Gedeihen des Kulturwaldes von ausschlaggebender Bedeutung und findet in der Forstwirtschaft entsprechende Beachtung. Andererseits bringt das Zusammenleben manche für das Gedeihen des Einzelbaumes günstige Erscheinung mit sich, so eine Ermäßigung der baumfeindlichen Wirkungen des Windes, Ausschluß starken Graswuchses, der dem Feuer den Weg in den Wald bahnt, und Schutz der Keimlinge gegen starke Besonnung und manche Konkurrenten. Dieser Schutz kann allerdings durch die Konkurrenz und Schattenwirkung der Mutterbäume selbst in einen Nachteil verwandelt werden. Einen Maßstab zur Beurteilung der für den Forstmann wichtigen Konkurrenzverhältnisse im Wald liefert seine Helligkeit. Das Licht im Innern der Einzelkronen und Bestände ist deshalb quantitativ und qualitativ untersucht worden, zuletzt von Ramann (Allg. Forst- und Jagdztg. Dezember 1911) mit dem Selenphotometer. Die meisten Naturwälder sind Mischwälder, d. h. sie bestehen aus einem bunten Gemisch von Bäumen verschiedener Art und verschiedenen Alters, unter denen im Norden und in hohen Gebirgen oft Nadelhölzer, meist aber die Laubhölzer vorherrschen. Wo in der Natur reine, d. h. aus einer herrschenden Baumart mit nur untergeordneter Beimengung anderer Arten bestehende Wälder vorkommen, verdankt die herrschende Art ihr Uebergewicht teils besonders reichlicher Samenproduktion, teils einer viele Konkurrenten ausschließenden Schattenwirkung des lebenden oder abgefallenen Laubes, teils endlich einer Anpassung an besondere Lebensbedingungen; die anderen Baumarten nicht zusagen. Die Salwälder (Shorea robusta) Britisch-Indiens, die Tiekwälder (Tektona grandis) in Mitteljava, Indien, Siam und Burma, Bambusbestände, Palmwälder und Mangrovewälder tropischer Küsten, und Wälder, in denen die eine oder die andere unserer europäischen Holzarten vorherrscht, sind Beispiele.

Die günstigsten Bedingungen für das Baumleben bieten die immerfeuchten Tropenge-

biete. Hier ist die Heimat der Regenwälder, die sich durch große Höhe der Bäume (meist mehr als 30 m), relativ große, meist immergrüne hygrophile Blätter und Reichtum an holzigen Lianen auszeichnen, und der Nebelwälder im Gebirge, in deren stets feuchter Luft dazu noch ein großer Reichtum an Epiphyten und großen Farnen tritt. Ihnen schließen sich in Gebieten mit tropischem Seeklima, aber Trockenperioden die Monsunwälder an, die während und gegen Ende der Trockenzeit ihr Laub verlieren, meist weniger hochstämmig sind als der Regenwald, und arm an Holzlianen und Epiphyten sein können (Tiekwälder). Ausgesprochen xerophytische Anpassungen zeigen die Savannenwälder und Dorngehölze. Die hauptsächlichsten Waldformen unserer gemäßigten Zone sind die Sommerwälder und die Hartlaubgehölze. Die Bäume jener tragen im Sommer meist hygrophiles abfälliges Laub (unsere Laubhölzer, Lärche) und setzen im Winter der Verdunstung nur die kleine, durch Kork geschützte Oberfläche der kahlen Aeste oder, soweit sie immergrün sind (Fichte, Tanne), xerophile Nadeln aus. Der einzige echte Xerophyt dieser Wälder ist die Kiefer. Hartlaubgehölze sind eine Waldform mild gemäßigten Klimas mit Winterregen und langer Sommerdürre, wie es die Umgebung des Mittelmeers besitzt. Ihre Bäume sind niedrig und besitzen immergrüne kleine Blätter mit xerophilen Anpassungen (Oelbaum, Steineiche, Zypressen).

Die Bedingungen, von denen die floristische Zusammensetzung der Wälder abhängt, sind sehr komplizierter Natur. In den Tropen haben fast alle Familien baumförmige Vertreter, die meist in buntem Gemisch untereinander wachsen. Leguminosen, Moraceen, Euphorbiaceen, Verwandte der Malvaceen sind unter den bekannteren Familien in den Regenwäldern, Cupuliferen und Coniferen in den Sommerwäldern, Myrtaceen und Proteaceen in den Hartlaubgehölzen, Akazien und Burseraceen im Dornbusch relativ reichlich vertreten. Die Gründe dafür, daß in den kälteren Klimaten auffallend wenige Familien baumförmige Arten besitzen, daß manche in allen Waldformen, andere im wesentlichen nur in einzelnen vorkommen, ferner der Einfluß von Wanderungen und erdgeschichtlichen Vorgängen auf die Verteilung der Baumarten gehören nebst näherer Schilderung der Waldformen in das Gebiet der Pflanzengeographie (vgl. den Artikel „Geographie der Pflanzen").

Literatur. ***M. Büsgen,*** *Bau und Leben unserer Waldbäume. Jena 1897.* — ***Kirchner, Schröter und Rickli,*** *Die Coniferen. Lebensgeschichte der Blütenpflanzen Mitteleuropas Bd. I Abt. 1. Stuttgart 1908/11.* — ***M. Büsgen,*** *Die Cupuliferen. Lebensgeschichte der Blütenpflanzen Mitteleuropas Bd. II Lfg. 1. Stuttgart 1908/11.* — ***Ad. Engler,*** *Pflanzenwelt Afrikas Bd. I. Leipzig.* — ***Jost,*** *Vorlesungen über Pflanzenphysiologie. 2. Aufl. Jena 1908.* — ***Klebs,*** *Ueber die Rythmik in der Entwickelung der Pflanzen. Sitzungsber. der Heidelberg. Akad. 1911, 23.* — ***Lorey,*** *Handbuch der Forstwissenschaft. 2. Aufl. Tübingen 1903.* — ***A. Schimper,*** *Pflanzengeographie. Jena 1898.* — ***E. Strasburger, Jost, H. Schenck, G. Karsten,*** *Lehrbuch der Botanik. 10. Aufl. Jena 1910.* — ***H. Vöchting,*** *Organbildung im Pflanzenreich. Bonn 1878 und 1884.* — ***L. Beissner,*** *Handbuch der Nadelholzkunde. 2. Aufl. Berlin 1909.* — ***C. K. Schneider*** *Handbuch der Laubholzkunde. Jena 1906 ff.*

M. Büsgen.

Beaumont

Elie Jean Baptiste Armand Louis Léonce de.

Er entstammte einem alten normannischen Adelsgeschlecht. Er wurde am 25. September 1798 in Canon (Départ. Calvados) geboren und erhielt seine Vorbildung im Collège Henri IV zu Paris. Nachdem er die École polytechnique in Paris mit glänzendem Erfolge besucht hatte, trat er 1819 an die École des Mines über, um sich dem Bergfach zu widmen. 1822 begleitete er mit seinem Studienfreund Dufrenoy den Professor der Geologie Brochant de Villiers nach England, um die dortigen Bergwerksverhältnisse zu studieren. Die Resultate der Reise legte er gemeinschaftlich mit den genannten Forschern in dem Werk Voyage métallurgique en Angleterre (Paris 1827) nieder. Seit 1825 beschäftigte er sich neben Dufrenoy mit der geologischen Erforschung Frankreichs und Herstellung einer geologischen Karte dieses Landes, die nach 18 Jahren vollendet wurde und in wissenschaftlicher und technischer Beziehung ein Meisterwerk darstellte. 1827 wurde er Professor für Geologie an der École des Mines 1832 auch am College de France, 1835 erhielt er das Generalinspektorat der Bergwerke, wurde Mitglied der Akademie und 1856 deren ständiger Sekretär. Weiter wurde er Großoffizier des Ordens der Ehrenlegion, Senator des Kaiserreichs, seit 1861 auch Vizepräsident des Conseil Général des Mines, war also eine sehr einflußreiche Persönlichkeit. Großes Verdienst erwarb er sich durch seine geistvollen Studien über das Alter und die Entstehung der Gebirgssysteme, die er in den Recherches quelques-unes des révolutions de la surface du globe (Paris 1834) und Notices sur les systèmes de montagnes (Paris 1852) veröffentlichte. Er suchte darin die Hebungs- und Streichungsrichtungen der Gebirge in gesetzlichen Zusammenhang zu bringen mit der Kugelform und der fortschreitenden Erkaltung des Erdkörpers. Von 1867 an bis zu seinem Tode am 21. September 1874 in Paris leitete er die geologische Spezialaufnahme Frankreichs in größerem Maßstabe. Doch wurden diese Qrbeiten durch die Kriegsereignisse sehr verzögert.

Außer den genannten sind von seinen Arbeiten besonders wichtig: Observations géolo-

giques sur les différentes formations dans le système des Vosges (Paris 1829); in Gemeinschaft mit Dufrenoy: Mémoires pour servir à une description géologique de la France. 4 vol. Paris 1830 bis 1838, 8⁰ und Explication de la carte géologique de la France. 2 vol. Paris 1841 bis 1848, 4⁰; Sur les émanations volcaniques et métallifères. Bull. Soc. géol. de Fr. 1847. IV. p. 1249; Leçons de Géologie pratique (Paris 1845).

Literatur. ***J. Bertrand,*** *Éloges historique etc., Institut de France 1875.* — ***Sainte-Claire Deville,*** *Coup d'oeil historique sur la Géologie et sur les travaux d'Elie de Beaumont, Paris 1878.*

O. Marschall.

Becquerel
Alexandre Edmond.

Geboren am 24. März 1820 zu Paris; gestorben daselbst am 13. Mai 1891. Er war der Sohn von Antoine César Becquerel und wurde Assistent und später Professor der Physik am Conservatoire des arts et metiers in Paris. Becqeurel arbeitete auf dem Gebiet der Optik und Elektrizität, lieferte die erste brauchbare Photographie des Sonnenspektrums und der ultraroten Strahlen, stellte Untersuchungen über Phosphoreszenz an.

E. Drude.

Becquerel
Antoine César.

Geboren am 7. März 1788 in Chatillon-sur-Loing im Departement Loiret; gestorben am 18. Januar 1878 in Paris. Er besuchte die polytechnische Schule in Paris, trat 1808 in das Ingenieurkorps ein, machte 1810 bis 1812 unter General Suchet den spanischen Feldzug mit, nahm 1815 aus Gesundheitsrücksichten den Abschied, wurde als Professor am Musée d'Histoire angestellt und widmete sich von da an ausschließlich dem Studium der Physik und Chemie. Becquerel konstruierte — fast gleichzeitig mit Daniell — das erste konstante galvanische Element; ihm verdankt die Physik die exakte Bestimmung der thermo-elektrischen Kräfte.

Literatur. ***Bassal,*** *Éloge biographique de A. C. B., Paris 1879.*

E. Drude.

Becquerel
Henri.

Geboren am 15. Dezember 1852; gestorben in Paris 1908. Er war der Sohn von Alexandre Edmond Becquerel und trat 1872 in die École polytechnique, 1874 in die École des Ponts et des Chaussées, übernahm dann eine Anstellung am Musée d'Histoire, wurde 1889 Mitglied des Institut des France, 1908 ständiger Sekretär der Akademie in Paris. 1876 veröffentlichte er eine Abhandlung über die Drehung der Polarisationsebene durch Magnetismus. Eine Untersuchung der Wirkung ultraroter Strahlen auf phosphoreszierende Substanzen führte ihn auf Uranverbindungen, deren Radioaktivität er 1896 feststellte. Im Elektroskop entdeckte Becquerel ein Mittel verschiedene Arten von Strahlen zu unterscheiden. Er untersuchte ferner den Magnetismus von Nickel und Kobalt, die Temperatur der Sonne, den Zeemanneffekt.

Literatur. *Revue générale des sciences, S. 802 bis 813, 1908.*

E. Drude.

Beer
August.

Geboren am 31. Juli 1825 in Trier; gestorben am 18. November 1863 in Bonn. Er habilitierte sich 1850 in Bonn, wurde 1855 dort Professor. Beer stellte das unter seinem Namen bekannte Gesetz der Absorption des Lichts in einem Medium auf.

E. Drude.

Beetz
Wilhelm.

Geboren am 27. März 1822 in Berlin; gestorben am 22. Januar 1886 in München. Er habilitierte sich in Berlin, wurde Professor an der Artillerieschule und am Kadettenhaus, 1855 Professor in Bern, 1858 in Erlangen, 1868 an der technischen Hochschule in München, deren Direktorium er von 1874 bis 1877 inne hatte. 1876 wurde ihm der persönliche Adel verliehen. Beetz arbeitete über galvanische Polarisation, über Leitungswiderstände in Flüssigkeiten u. a.

E. Drude.

Befruchtung.

1. Die sichtbaren Erscheinungen der Befruchtung (Morphobiologie der Befruchtung). a) Entstehungsgeschichte der Geschlechtszellen (Gametogenesis). b) Reife Geschlechtszellen. c) Befruchtung und Begattung d) Verlauf der Befruchtung. e) Reifung und Befruchtung bei höheren Pflanzen und Einzelligen. f) Chromosomenverhältnisse. 2. Theorie der Befruchtung (Verhältnis zu anderen Lebenserscheinungen und biologische Bedeutung). a) Verbreitung; Verhältnis zur asexuellen Vermehrung und Reifung. b) Befruchtung und Entwickelungserregung. c) Befruchtung und Vererbung.

Unter Befruchtung im engeren Sinne versteht man jetzt allgemein die Vereinigung zweier Geschlechtszellen (Sexual-, Fortpflanzungszellen, Gameten) und ihre Kerne. Man denkt also dabei nicht, wie dies früher vielfach der Fall war, an eine Bewirkung, also an die Erregung oder Belebung des Eies oder an die Vereinigung zweier Vererbungstendenzen (Amphimixis), sondern an eine Gruppe von Vorgängen, nämlich an alle die, kraft deren die aufeinander angewiesenen Geschlechtszellen in unmittel-

bare Beziehung zueinander treten und sich zu einer neuen Einheit vereinigen (Boveri). Diese Vorgänge nehmen ihren Anfang, nachdem die Geschlechtszellen durch den Begattungs- oder Besamungsakt einander passiv genähert worden waren.

Scharf auseinanderzuhalten sind also die Begriffe der Befruchtung einerseits, die der Begattung und Besamung andererseits (s. unten). Im vulgären Sprachgebrauch ist dies nicht der Fall, wie denn beispielsweise von der „Befruchtung" der Bienenkönigin beim Hochzeitsflug gesprochen wird.

Der Ausdruck findet zunächst, wie aus der Begriffsbestimmung hervorgeht, für solche Organismen, die Geschlechtszellen bilden, also für die vielzelligen Tiere und Pflanzen, Anwendung. In physiologischen Betrachtungen allgemeiner Art versteht man jedoch darunter auch die Vorgänge bei Einzelligen, die dem Befruchtungsakt der höheren Tiere und Pflanzen homolog sind, also die Verbindung zweier Individuen oder die Konjugation im weiteren Sinne.



Fig. 1. Differenzierung der Geschlechtszellen bei Chironomus (Vier- bis Achtzellenstadium). Oben die Teilungen der Somakerne, unten die der Urgeschlechtszelle. Nach Hasper.

1. Die sichtbaren Erscheinungen der Befruchtung (Morphobiologie der Befruchtung). 1a) Entstehungsgeschichte der Geschlechtszellen (Gametogenesis). Bei den vielzelligen Tieren, von denen die folgende Darstellung zunächst ausgeht, lassen sich in vielen Fällen die Keimzellen, wie man ganz allgemein die Ausgangselemente oder Aszendenten der befruchtungsfähigen Geschlechtszellen im Gegensatz zu den somatischen, Soma-, Körper- oder Gewebszellen zu nennen pflegt, von frühen Stadien der Embryonalentwickelung an verfolgen. Zuerst ist für einige Dipteren gezeigt worden, daß sich schon in den allerersten Stadien der Eientwicklung, bei Chironomus (Fig. 1) schon im 4-Zellen-Stadium, die Keimzellen (Pol-, Urgeschlechtszellen) von dem übrigen Zellmaterial absondern, um später den generativen Elementen den Ursprung zu geben.

Vollkommen sichere Beobachtungen liegen auch für den Pferdespulwurm und für die Copepoden vor. Bei beiden läßt sich die ganze Zellenfolge, die vom befruchteten Ei zu der ersten Anlage der Geschlechtsdrüsen oder Gonaden führt und in welcher allmählich das der Fortpflanzung dienende germinative oder propagatorische Zellenmaterial von den somatischen (ekto-, ento-, mesodermalen) Elementen abgetrennt wird, auf Grund bestimmter, bei den einzelnen Teilungsakten auftretender histologischer Eigentümlichkeiten Schritt für Schritt verfolgen.

Man nennt diese Zellenfolge (siehe beifolgendes Schema) die Keimbahn oder besser die erste, differentielle oder somato-germinative Keimbahnstrecke; die in dieser direkten Deszendenz gelegenen Keimbahnzellen, von welchen einerseits wieder Keimbahnzellen, andererseits die Ursomazellen, d. h. die Ausgangszellen der Embryonalgewebe abstammen, werden auch als Stammzellen bezeichnet. Ferner wird für die ersten Generationen der eigentlichen Keimzellen oder rein germinativen Zellen, von welchen keine Ursomazellen mehr, sondern nur noch propagatorische Zellen, sowie funktionell abgeänderte oder abortiv werdende Schwesterelemente, Nährzellen, Richtungskörper usw. stammen, die Bezeichnung Urgeschlechtszellen oder Urgenitalzellen angewandt. In einzelnen Fällen empfiehlt es sich, die erste rein germinative Zelle als Urgeschlechtsmutterzelle von ihren Abkömmlingen, den Urgeschlechtszellen oder Urgenitalzellen im engeren Sinne, zu unterscheiden (s. Schema). Es ergibt sich also folgendes Schema:

1. Keimbahnstrecke:

Befruchtetes Ei
/ \\
1. Stammzelle[1]) 1. Ursomazelle
/ \\
2. Stammzelle 2. Ursomazelle
/
n. Stammzelle
/ \\
Urgeschlechtsmutterzelle n + 1. Ursomazelle
/ \\
Urgeschlechtszellen

[1]) Mitunter wird das befruchtete Ei selbst als 1. Stammzelle gerechnet.

Die Stamm- oder Keimbahnzellen können nun erstens durch einen besonderen Kernteilungsverlauf ausgezeichnet sein.

Beim Pferdespulwurm (Ascaris megalocephala) z. B. treten bei der ersten Teilung des befruchteten Eies lange, schleifenförmige Chromosomen auf. Dieser Chromosomentypus (vgl. Fig. 2 in der Zelle P_1) erhält sich in den Teilungen der Stammzellen bis zum 5. oder 6. Teilungsschritt, der die beiden Urgeschlechtszellen liefert. In den Schwesterzellen der Stammzellen, den Ursomazellen, findet dagegen im Verlauf der Teilung eine sogenannte Diminution statt (Fig. 2 S_1): Die verdickten Enden der Chromosomen werden abgestoßen und später im Cytoplasma resorbiert, während die durch Segmentierung der mittleren Chromosomenabschnitte entstehenden körnchenförmigen Teilchromosomen allein den mitotischen Prozeß durchführen. In den Abkömmlingen der Ursomazellen treten bei der Teilung von vornherein kleine körnchenförmige Chromosomen auf.

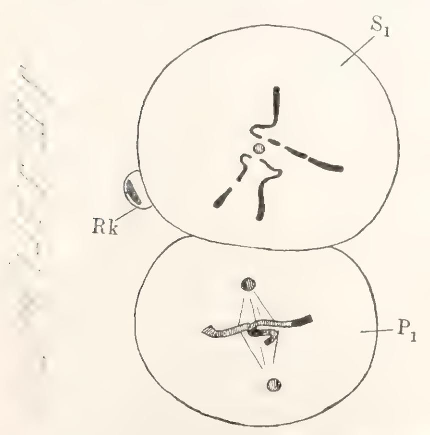


Fig. 2. Differenzierung der Geschlechtszellen bei Ascaris (Zweizellenstadium). S_1 erste Ursomazelle, P_1 erste Stammzelle, RK Richtungskörper. Nach Boveri.

Auch bei den Copepoden (besonders bei Cyclops), bei denen übrigens pathologischerweise auch ein dem Diminutionsvorgang von Ascaris ganz ähnlicher Prozeß vorkommen kann, wird der in der ersten Furchungsteilung auftretende besondere Kernteilungstypus (eine Abart des aus dem Salamanderhoden bekannten heterotypischen Modus) innerhalb der Keimbahn bis zur Teilung der Urgeschlechtsmutterzelle festgehalten. Hier unterscheiden sich aber die Stammzellen noch durch einen zweiten Punkt von den Ursoma- und den übrigen Embryonalzellen. Im normalen Verlauf sind nämlich die Stammzellen einschließlich des ungeteilten Eies dadurch gegenüber den anderen Embryonalzellen ausgezeichnet, daß bei ihrer Teilung im Umkreis des einen Pols der Teilungsfigur färbbare Körnchen (Außenkörnchen, Ektosomen) offenbar als Nebenprodukte des Stoffwechsels zur Abscheidung kommen (Fig. 3). Diese Gebilde gelangen, wahrscheinlich zusammen mit dem sie produzierenden, besonders beschaffenen Keimbahnplasma, bei der Teilung in diejenige Schwesterzelle,

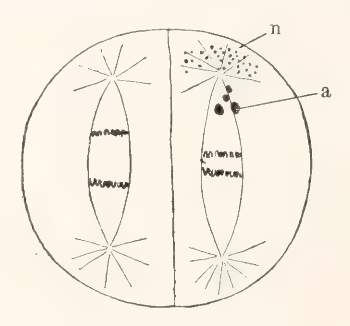


Fig. 3. Geschlechtszellendifferenzierung bei Kopepoden (Zwei- bis Vierzellerstadium). a die bei der ersten Teilung gebildeten alten Körnchen, n die während der zweiten Teilung in der Stammzelle sich bildenden Körnchen.

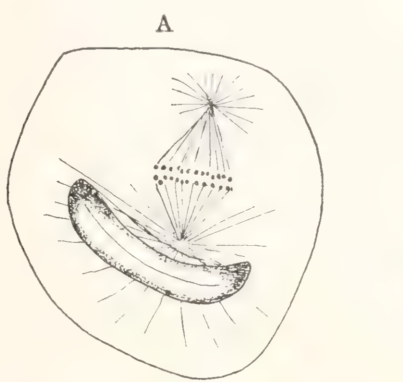
welche die Stammzelle der folgenden Zellgeneration darstellt, verschmelzen hier während des Ruhestadiums zu unförmigen Klumpen und werden resorbiert. Während sich die letzte Stammzelle, die Urgeschlechtsmutterzelle, teilt und so die paarigen Urgeschlechtszellen bildet, treten die Körnchen nicht mehr einseitig, sondern im ganzen Umkreise der Teilungsfigur auf, ein Hinweis darauf, daß diese Zellen nur noch Keimbahnplasma enthalten. Die Körnchenzellen stellen also die direkten Etappen der Keimbahn dar.

Drittens können die Stammzellen von den übrigen Embryonalzellen dadurch unterschieden sein, daß sie hinter ihnen hinsichtlich der Teilungsgeschwindigkeit mehr und mehr zurückbleiben („zunehmende Phasendifferenz"). Dies ist z. B. auch wieder bei den Copepoden (Fig. 3) und ebenso bei Sagitta der Fall.

Viertens üben die Stammzellen auf verschiedene Körper von anscheinend mehr passiver Beweglichkeit eine Art Anziehung aus. So liegen z. B. die Verhältnisse beim Pfeilwurm (Sagitta), wo ein kompakter, stark färbbarer („nucleolider") Körper, der den degenerierten Kern einer eingewanderten Epithelzelle darstellen soll, und späterhin seine brockenartigen Zerfallsprodukte innerhalb der Keimbahn von Zelle zu Zelle übermittelt werden. Auch bei anderen Formen

sieht man rundliche Körper von schaumiger Struktur oder körnige Substanzmassen früher oder später in eine engere Beziehung zu den Keimbahnzellen treten, wodurch diese histologisch gegenüber den Somazellen hervorgehoben werden: Dies gilt für die „Kopulationszelle" der Daphniden, für den eingewanderten zweiten Richtungskörper bei den Kopepoden, für den übrig gebliebenen Keimbläschennucleolus (Metanucleolus) bei parasitischen Hymenopteren usw.

Auch in der zweiten, rein-germinativen Keimbahnstrecke, die sich von der Entstehung der Urgeschlechtszellen bis zur Bildung der reifen Fortpflanzungselemente erstreckt, kann die direkte Aszendenz der letzteren durch besondere Strukturen gekennzeichnet sein. So ist im Ovarium von Dytiscus bei den Teilungen, welche zur Bildung einerseits der unreifen Eizelle, andererseits der Nährzellen führen, die direkte Vorfahrenreihe der ersteren, also die Keimbahn, durch eine färbbare Masse (den Giardinaschen Ring) gekennzeichnet, welche sich vor jeder Teilung vom Kern der Keimbahnzelle abspaltet, während der Teilung passiv liegen bleibt (Fig. 4A) und nach der Teilung dem Kern der nächstfolgenden Vorfahrenzelle wieder einverleibt wird (Fig. 4B).



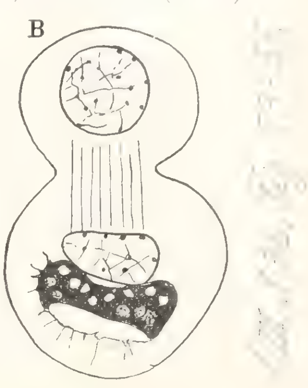


Fig. 4. Differenzierung der Keim- und Nährzellen in den Eiröhren von Dytiscus. Nach Giardina. A Lage des Rings im Aequatorialplattenstadium, B Vereinigung mit demjenigen Tochterkern, welcher in der Keimbahn selber liegt.

Bezüglich der Entstehung und physiologischen Bedeutung aller dieser Strukturen sowie ihrer gegenseitigen Beziehungen besteht noch keine Uebereinstimmung der Auffassung, jedenfalls steht aber fest, daß die Keimbahnzellen in vielen Fällen von den Somazellen histologisch und physiologisch scharf unterschieden sind, sei es daß sie gewisse Besonderheiten im Ablauf der Kernteilung zeigen oder daß sie zur Produktion bestimmter Stoffe allein befähigt sind oder endlich daß sie bei der Teilung infolge der chemischen oder physikalischen Besonderheit ihres Protoplasmas gewisse bewegliche Körper verschiedener Herkunft an sich ziehen.

Auch bei verschiedenen Wirbeltieren (Fischen, Amphibien, Reptilien) konnten schon in frühen Entwickelungsstadien, noch vor dem Auftreten der leistenförmigen Geschlechtsdrüsenanlagen (Genitalleisten), die Keim- oder Urgeschlechtszellen nachgewiesen werden, jedoch ist bei ihnen eine Ableitung von bestimmten Furchungszellen bisher nicht mit Sicherheit möglich gewesen.

Indem die Urgeschlechtszellen, gewöhnlich nach längerer Ruhepause, sich zu vermehren beginnen, oder, falls im Embryo von vornherein eine größere Anzahl vorhanden ist, sich enger zusammenschließen, entstehen, unter Beteiligung anderer (mesodermaler oder mesenchymatischer) Embryonalzellen, die zunächst geschlechtlich indifferent erscheinenden Geschlechtsdrüsen oder Gonaden.

In einer bestimmten Entwicklungsphase läßt sich dann der Geschlechtscharakter der Gonaden unterscheiden; im Hoden (Testis) bilden sich die indifferenten Geschlechtszellen zu Ursamenzellen oder Spermatogonien, im Eierstock (Ovarium) zu Ureizellen oder Ovogonien (Oogonien) um und damit beginnen die Prozesse der Samenbildung oder Spermatogenesis (Spermiogenesis) und der Eibildung oder Ovogenesis (Oogenesis) ihren Anfang zu nehmen.

In beiden Fällen hat man zunächst eine Teilungs- oder Vermehrungsperiode zu unterscheiden, während welcher die Spermatogonien und Ovogonien einer mehr oder weniger lebhaften Vermehrung unterliegen. In schlauchförmigen Geschlechtsdrüsen und bei einer mehr kontinuierlichen Geschlechtszellenbildung hebt sich eine bestimmte Zone von häufig syncytialem Charakter, die Keimzone, ab, die mit den aufeinanderfolgenden Generationen der Ursamen- oder Ureizellen angefüllt ist (Fig. 5 kz).

In der nun folgenden Wachstumsperiode oder Wachstumszone tritt zunächst wieder ein Stillstand in der Vermehrungstätigkeit ein: namentlich im weiblichen Geschlecht erfahren die aus der letzten ovogonialen Teilung hervorgegangenen Eimutterzellen oder Ovocyten erster Ordnung (unreife Eier, Eierstockseier, Vor-

eier, Fig. 5 ooc) entweder noch im Ovarium (Säugetiere) oder zum Teil erst in den Ovidukten (Copepoden) eine beträchtliche Größenzunahme, welche im wesentlichen durch die Abscheidung von Dottermaterial (Fig. 5 ooc) im Eiplasma bedingt ist, während im männlichen Geschlecht in den Samenmutterzellen oder Spermatocyten erster Ordnung das Wachstum weniger stark hervortritt und nur in seltenen Fällen (z. B. bei Ascaris, Fig. 6a) eine Dotterbildung zustande kommt.

In der folgenden Periode der Samen- und Eibildung, in der Reifungsperiode oder in der Reifungszone, zeigen abermals die männlichen Elemente die einfacheren Verhältnisse. Auf Grund zweier sukzessiver Teilungen, der Reifungsteilungen (Fig. 6b bis d und e), verwandeln sich die Samenmutterzellen (Spermatocyten erster Ordnung) in zwei Samentochterzellen (Spermatocyten zweiter Ordnung, Fig. 6d) und vier Samenzellen (Spermatiden, Fig. 6e). Im weiblichen Geschlecht pflegt der Kern der Eimutterzellen, das Keimbläschen, meist unter beträchtlicher Volumenverminderung (vgl. Fig. 7a und b) vom Eizentrum an die Peripherie zu wandern und gleichzeitig die späteren Prophasen und früheren Metaphasen der Teilung zu durchlaufen. Die erste Teilungsfigur (Fig. 7b) bleibt in sehr vielen Fällen längere Zeit im Zustande der späteren Metaphase an der Peripherie liegen, eine Bereitschaftsstellung, während welcher dann die Samenzelle in das Ei eintritt, also die Befruchtung eingeleitet wird und in vielen Fällen auch die Eiablage stattfindet. Es erfolgt eine asymmetrische Zellteilung (Fig. 7c), die zur Bildung einer großen Eitochterzelle (Ovocyte II. Ordnung, Fig. 7c o) und einer kleinen rudimentären Zelle, des ersten Richtungskörpers (rk') führt. Unmittelbar darauf wiederholt sich der gleiche Prozeß (Fig. 7d bis e) und es kommt zur Bildung der reifen Eizelle und des zweiten Richtungskörpers (Fig. 7e rk'').

Zuweilen erfolgt gleichzeitig mit der zweiten Reifungsteilung eine mehr oder weniger regelmäßige Teilung des ersten Richtungskörpers, so daß im ganzen drei Richtungskörper gebildet werden. Im Fall der Parthenogenesis (Entwickelung ohne Befruchtung) werden entweder zwei (Honigbiene, Ameisen, Gallwespen, einzelne Schmetterlinge, wie Liparis dispar) oder nur ein einziger Richtungskörper (Rotatorien, Cladoceren, Ostracoden, Aphiden) gebildet. Bei Artemia salina werden entweder zwei Richtungskörper gebildet, in welchem Falle der zweite Richtungskörper sich nachträglich wieder mit dem Eikern vereinigt, oder es kommt nur zur Ausstoßung des ersten Richtungskörpers.

Findet die Bildung der Richtungskörper noch vor der Abscheidung der Eimembran (Dotterhaut) statt, so können sich die Richtungskörper vollkommen vom Ei abtrennen (Seeigel), andernfalls gehen sie entweder eine engere Verbindung mit der Eimembran ein (Ascaris) oder es kann wenigstens der zweite ins Ei zurückwandern, wobei zuweilen eine Anziehung durch bestimmte Zellen erfolgt (Copepoden s. oben S. 891).

Es kann keinem Zweifel unterliegen, daß die Reifungsteilungen bei der Samen- und Eibildung stammesgeschichtlich und physiologisch einander entsprechen und daß also Ei- und Richtungskörper einerseits und die vier Samenzellen andererseits eine homologe Zellgeneration darstellen.

An die Reifungsperiode schließt sich besonders in der Samenbildung noch eine weitere Periode, die Umwandlungs-

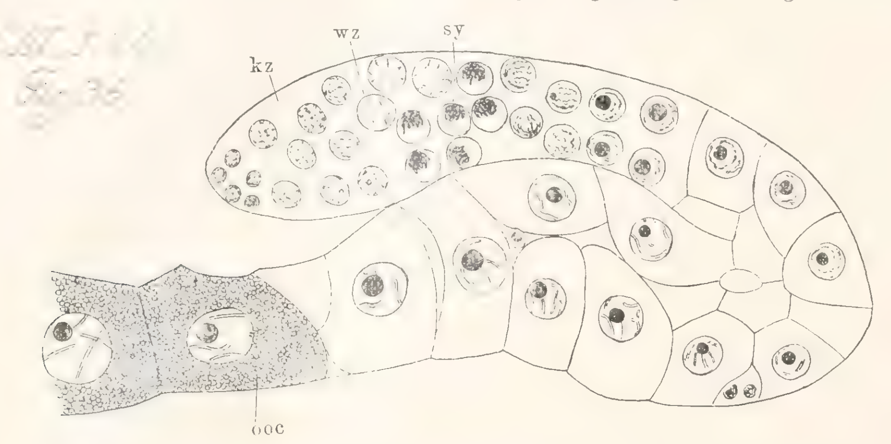


Fig. 5. Ovarium eines Copepoden (Canthocamptus). Etwas schematisiert.

periode an, während deren die Metamorphose der Samenzellen in die befruchtungsfähigen Samenfäden, Spermatozoen oder Spermien stattfindet. Charakteristische Momente des Umwandlungsprozesses sind speziell bei den typischen flagellatenähnlichen Spermatozoenformen, den Samenfäden im engeren Sinne: die Verdoppelung des Centrosomas der Samenzelle innerhalb seiner „Sphäre" (Fig. 8 A s) und seine Verlagerung an den Zellenrand (B c.a und c.p); Bildung des Mittelstückes oder Spermienhalses unter Beteiligung des inneren oder vorderen Centrosomas (B, C ca); Auswachsen des Schwanzfadens vom äußeren oder hinteren Centrosoma aus (B c.p); Streckung und Verdichtung des Kernes sowie Zurückbildung des größten Teiles des Cytoplasmas bis auf einen dünnen, den Kern

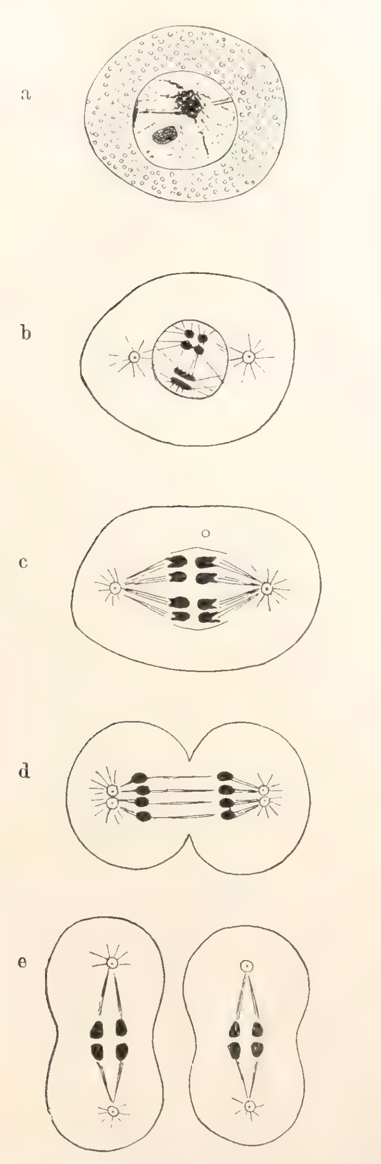


Fig. 6. Spermatidenbildung bei Ascaris. Nach Brauer. a Spermatogonie. b Spermatocyte I. O. c und d erste, e zweite Reifungsteilung.

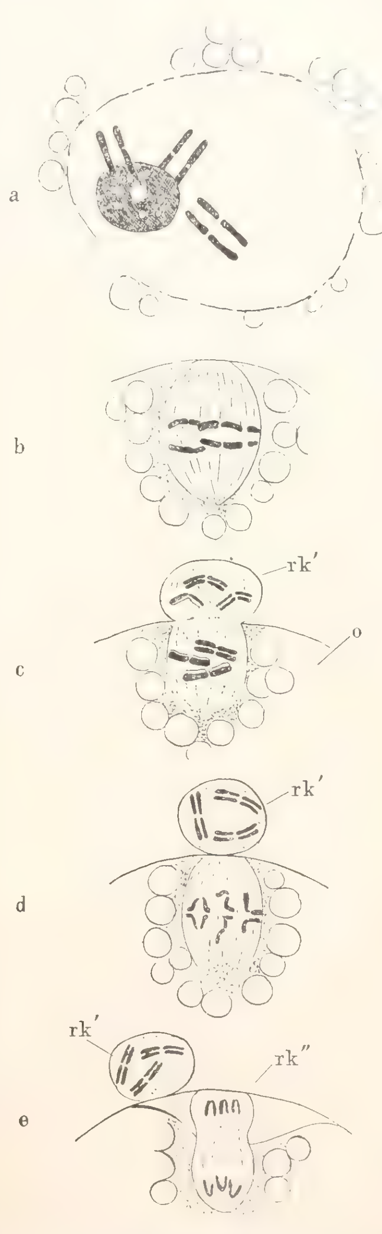


Fig. 7. Richtungskörperbildung bei Cyclops gracilis. Nach Matscheck. e schematisiert nach Bildern bei Cyclops viridis. a Keimbläschen, b und c erste, d und e zweite Reifungsteilung. rk′ erster, rk″ zweiter Richtungskörper, o Ei.

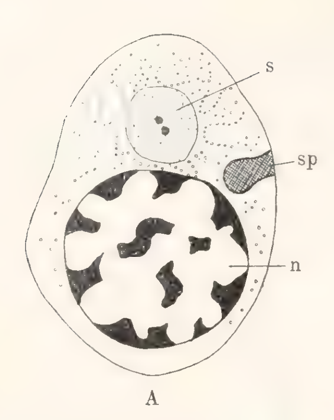
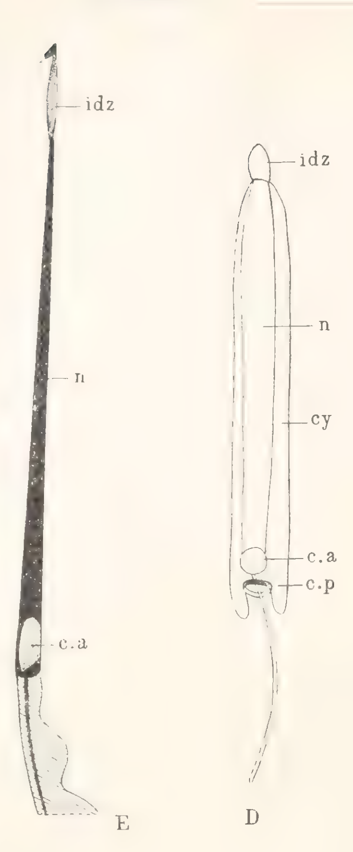


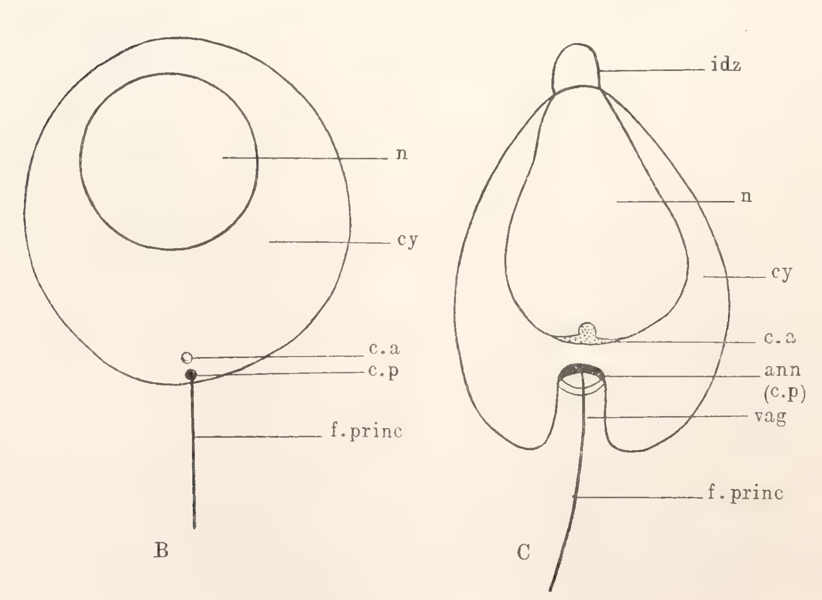
Fig. 8. Samenbildung bei Salamandra maculosa. Nach Meves und Waldeyer. ann ringförmiges hinteres Zentrosom, c.a und c.p vorderes und hinteres Cenrosom, cy Cytoplasma, f.princ filum principale (Hauptfaden) des Schwanzes, idz Idiozom, n Kern, s Sphäre, sp Spindelrest, vag Schwanzscheide (durch Einstülpung des hinteren Zellpols entstanden).



Restteil des achromatischen Teilungsapparates (Sphäre = Centrosomahülle, A s oder Spindelrest A sp) darstellt und als Idiozom bezeichnet zu werden pflegt.

Auch einige Eier durchlaufen teils vor, teils nach der Befruchtung eine Metamorphose. Letzteres gilt z. B. für das Vogelei, welches beim Eintritt in den Eileiter nur von der als Zellmembran zu deutenden Dotterhaut umgeben ist und innerhalb des drüsenreichen Eileiters mit akzessorischen Hüllen (Eiweiß und Kalkschale) versehen wird.

1 b) Reife Geschlechtszellen. Die reifen Geschlechtszellen der beiden Geschlechter zeigen entsprechend den verschiedenen speziellen Funktionen, die sie ab-



umgebenden Belag (D cy); Ausbildung des Spitzenstückes (C bis E idz) unter Beteiligung eines Körpers, der wahrscheinlich einen von der zweiten Reifungsteilung übriggebliebenen

gesehen von ihrer gemeinsamen, für die Arterhaltung und Artbildung anzunehmenden Bedeutung haben, bei den meisten Vielzelligen eine weitgehende morphologische

Differenzierung. Die männlichen Geschlechtszellen, denen die spezielle Aufgabe zufällt, das Ei aufzusuchen, in sein Inneres einzudringen und die jungen Keime zur Teilung anzuregen, sind in der Regel sehr kleine, mit einem lokomotorischen und einem Bohr-

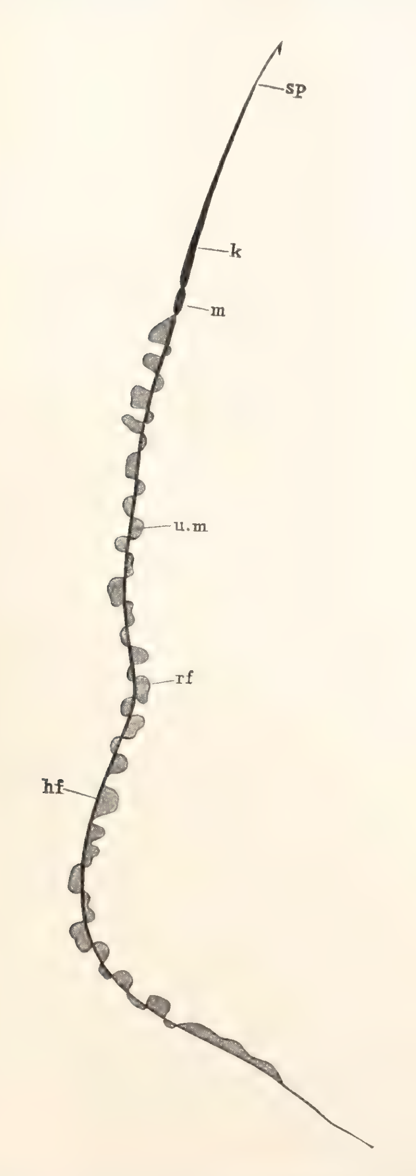


Fig. 9. Samenfaden von Salamandra. Nach Ballowitz.

apparat ausgestattete Zellen, welche außerdem besondere Differenzierungen beherbergen, von welchen aus der Teilungsmechanismus des befruchteten Keimes in Gang gesetzt wird. Die weiblichen Geschlechtszellen dagegen, welche bei dem Befruchtungsakt selber eine mehr passive, zuwartende Rolle spielen, andererseits aber das ganze Material oder wenigstens die ersten Grundlagen für den Aufbau des Embryos zu liefern haben, sind große, unbewegliche Zellen, die mehr oder weniger reich mit Nährmaterial (Dotterelementen) ausgestattet sind und außerdem verschiedenartige, teils der Ernährung, teils dem Schutze des Embryos dienende Hüllen besitzen.

Die Vielseitigkeit der Funktion der männlichen Zellen kommt besonders deutlich im Bau der flagellatenähnlichen Spermien, der Samenfäden im engeren Sinne, zum Ausdruck. So zeigen beispielsweise die Samenfäden der urodelen Amphibien (Fig. 9) folgende Abschnitte: das Spitzenstück (Bohrapparat sp) mit Widerhaken, der Kopf (der eigentliche Zellkörper k) mit dem Kern, das Mittelstück (m) mit zwei hintereinander gelegenen, vom Centrosoma der unreifen Samenzelle abzuleitenden Differenzierungen (Fig. 8 B bis D c.a und c.p), und der Schwanzfaden mit der undulierenden Membran (Fig 9 u.m), d. h. einem dem Hauptfaden (hf) angelagerten, krausenartig gefalteten, mit offenbar kontraktilem Randfaden (rf) versehenen Saum, dessen wellenförmige Kontraktionen zweifellos die Vorwärtsbewegung des Samenfadens bewirken.

Die am einfachsten gebauten Samenzellen sind wohl die rhizopodenähnlichen mancher Wasserflöhe (Cladoceren), zu den kompliziertesten gehören die der dekapoden Krebse. Bei diesen ist der Schwanzfaden zu einer Art von Explosionsapparat umgewandelt, welcher bei Eindringen von Wasser zur Entladung kommt und den Kopf der Zelle in das Ei hereintreibt.

Besondere Vorkommnisse sind die Riesenspermatozoen sowie die zweiköpfigen und zweikernigen Samenzellen, die beispielsweise beim Menschen als abnorme Bildungen auftreten, die paarweise gekuppelten Samenfäden bei Schwimmkäfern (Dytiscus) und Beuteltieren (Didelphys), sowie die regelmäßig dimorphen Elemente bei Prosobranchiern und Spinnern. Bei ersteren treten neben haarförmigen, normalkernigen (eupyrenen) wurmförmige Spermien mit unvollständigem Kerne (oligopyrene), bei letzteren normalkernige und kernlose (apyrene) auf. Während über die Bedeutung dieses Dimorphismus nichts Sicheres bekannt ist, scheint das Auftreten abortiver, richtungskörperähnlicher Samenzellen bei Bienen und Wespen, Rebläusen und Blattläusen mit dem unter f zu besprechenden, verschiedenen Chromosomenbestand der Samenzellen vieler Tiere und also mit der Geschlechtsbestimmung zusammenzuhängen.

Zu den am höchsten differenzierten tierischen Eiern gehören die der Vögel (Fig. 10). Hier wird die eigentliche Eizelle (Eimutterzelle oder Ovocyte I. Ordnung) durch die im Eierstock zur Entwicklung kommende Dotterkugel, das Gelbei gebildet. Der Zell-

membran entspricht die Dotterhaut (dh); der Kern, das sogenannte Keimbläschen, ist in eine peripher gelagerte, linsenförmige Ansammlung feinkörnigen Zellprotoplasmas eingebettet, die die Bezeichnungen Keimscheibe, Bildungsdotter, Hahnentritt (k) führt; der Zelleib ist von dem Nährmaterial dicht erfüllt, welches als weißer Nahrungsdotter hauptsächlich eine zapfenförmige, der Keimscheibe als Unterlage dienende Innenmasse, die Latebra (l), bildet, als gelber Nahrungsdotter dagegen in konzentrischen, die Latebra schalenförmig umgebenden Schichten abgelagert ist. Nach dem Uebertritt in den Eileiter wird die Eizelle noch von mehreren akzessorischen Hüllen, der Eiweißhülle (ei), Schalenhaut (sh) und Kalk-

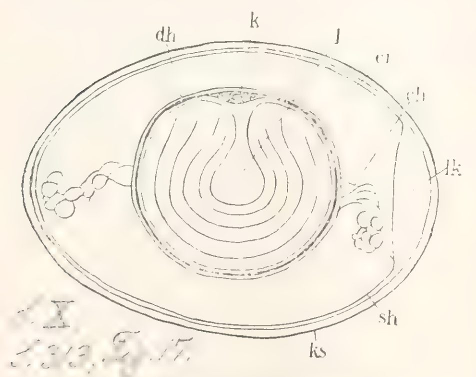


Fig. 10. Vogelei im Medianschnitt.

schale (ks) umgeben, die je noch eine besondere Differenzierung aufweisen können: es sind dies die Hagelschnüre oder Chalazen (ch), zwei spiralig gedrehte und wahrscheinlich als Puffer dienende Eiweißstränge; die Luftkammer (lk), ein linsenförmiger Raum, der durch Auseinanderweichen der beiden Schalenhautlamellen am stumpfen Eipol gebildet wird und ein Luftreservoir für das ausschlüpfende Junge darstellen soll; und die Pigmentablagerungen der Kalkschale, die als Schutz gegen direkte Insolation und vielfach auch als Maskierung (Schutz gegen Sicht) dienen.

Als Einlaßpforten für die Samenzellen dienen bei den Eiern vieler Tiere die Mikropylen, einfacher oder komplizierter gebaute Oeffnungen, welche bei Mollusken und Knochenfischen die Dotterhaut, bei den Insekten die hier als Chorion bezeichnete akzessorische Eihülle durchsetzen.

Bei der Konjugation der Einzelligen sind die Paarlinge oder Gameten vielfach von gleicher Größe (Isogameten, Isosporen), in anderen Fällen treten Gegensätze ähnlich denen zwischen Samen- und Eizelle hervor: so finden sich namentlich bei Sporozoen (Coccidien und Hämosporidien) ungleiche Gameten (Anisogameten, Anisosporen), nämlich große, unbewegliche, eiähnliche Makrogameten und kleine, bewegliche, spermienähnliche Mikrogameten. In jenem Fall wird von einer Isogamie (Homogamie), in diesem Fall von einer Anisogamie (Heterogamie) gesprochen.

Auch bei den vielzelligen Pflanzen sind die männlichen Elemente gegenüber der Eizelle vielfach durch Beweglichkeit gekennzeichnet. Insbesondere gilt dies für die mit Cilien ausgestatteten Spermatozoiden der Fucaceen, Characeen, Moose und Gefäßkryptogamen sowie von Cycas und Gingko, aber auch die spiralig gewundenen generativen Pollenkerne der Angiospermen scheinen nach dem Erguß des Pollenschlauchinhaltes in den Embryosack aktive, drehende Bewegungen auszuführen, um den Eikern bezw. die beiden Polkerne zu erreichen (Nawaschin).

1c) Befruchtung und Begattung. Die passive Annäherung und Begegnung der reifen Geschlechtszellen wird bei den Metazoen durch die Begattung (Kopulation) oder Besamung bewirkt. Bei der direkten inneren Begattung werden die Samenzellen mittels des männlichen Kopulationsorganes oder Penis direkt in die weiblichen Organe übertragen. Dies ist z. B. bei vielen Plattwürmern (Trematoden, Cestoden), bei Mollusken, Insekten, Haien, Reptilien, einzelnen Vögeln (Ratiten, Enten, einigen Hühnervögeln) und Säugern der Fall. Dabei werden die Samenzellen entweder zusammen mit einer eiweißartigen Flüssigkeit (liquor seminis) entleert, die der ganzen Masse, dem Sperma, eine milchartige Beschaffenheit verleiht, oder sie sind zum Zweck der Uebertragung zu paketartigen, von einer chitinigen oder gallertigen Hülle umgebenen Komplexen, den Samenpatronen oder Spermatophoren, vereinigt. Bei einigen Polycladen und bei Rotatorien wird der Penis in die Haut des Weibchens eingestochen und das Sperma in den Körper injiziert.

An der Erzeugung des Liquor seminis, dem in erster Linie die Funktion zukommt, die Beweglichkeit der Samenzellen durch Nahrungszufuhr hervorzurufen und zu unterhalten, sind bei den Säugern, insbesondere beim Menschen, wohl die meisten Teile des männlichen Geschlechtsapparates sekretorisch beteiligt, insbesondere die Nebenhoden, Samenleiterampullen, Samenblasen und Prostatadrüsen. Auf dem Gebiet der Wirbellosen ist hinsichtlich der Entstehung des flüssigen Substrates der Samenzellen und der Bedeutung der „Prostatadrüsen" (Gastropoden, Hirudineen) wenig Sicheres bekannt. Dagegen liegen über die Entstehung der Spermatophorenhüllen, z. B. bei Helix, sehr genaue Angaben vor (Meisenheimer).

Bei der indirekten inneren Begattung wird das in Samenpatronen vereinigte Sperma auf eine mehr mittelbare Weise übertragen. Entweder werden die Samenpatronen während

der Kopulation dem Weibchen angeheftet, worauf die Samenzellen nachträglich in die weibliche Samentasche (receptaculum seminis) übergeführt werden (Kopepoden) oder durch die Haut hindurch in die Nähe der Eier gelangen (manche Polycladen und Hirudineen). Oder es findet die Uebertragung durch besondere Apparate (modifizierte Kieferfühler der Spinnen, besonders differenzierter Kopfarm oder Hectocotylus bei Cephalopoden) statt oder es wird im Laufe der Liebesspiele die Samenpatrone vom Männchen abgelegt und dann von dem darüber kriechenden Weibchen in die Geschlechtsöffnung aufgenommen (urodele Amphibien). Bei der äußeren Begattung kommt die Vereinigung der Geschlechtszellen in der Weise zustande, daß während der Umklammerung des Weibchens durch das Männchen die Fortpflanzungselemente der beiden Geschlechter gleichzeitig ins Wasser austreten (Batrachier), während bei der freien Besamung die Abgabe und Vereinigung der Geschlechtszellen ohne Berührung der Elterntiere erfolgt (Medusen, Echinodermen, Fische).

Die Begattung braucht nicht unmittelbar von der Befruchtung gefolgt sein. In den Fällen z. B., in welchen die Samenzellen vom Weibchen in einer Samentasche aufbewahrt werden, kann die Befruchtung durch Monate (Feuersalamander) oder mehrere (4 bis 5) Jahre (Honigbiene) von der Begattung getrennt sein. Aber auch dann, wenn keine besonderen Aufbewahrungsorte vorhanden sind, kann ein längerer Zeitraum zwischen beiden Vorgängen verstreichen. So findet bei den Fledermäusen die Begattung im Herbst statt, während die Loslösung der Eier aus dem Eierstock und ihre Befruchtung durch die im Uterus aufbewahrten Samenzellen erst gegen das Frühjahr hin erfolgt. Beim Menschen können sich die Spermien eine Woche lang innerhalb der weiblichen Geschlechtswege befruchtungsfähig erhalten, beim Haushuhn ist dies etwa 10 bis 14 Tage lang der Fall, so daß ein Begattungsakt für die Befruchtung von etwa fünf aufeinanderfolgenden Eiern genügt.

Nachdem die Geschlechtszellen durch die Begattung oder Besamung einander passiv genähert sind, wird ihre endgültige Verbindung durch das aktive Bewegungsvermögen der Samenzellen (vgl. unter b) hergestellt. Dabei spielen chemotropische, vom Ei oder dem weiblichen Geschlechtsapparat ausgehende Reizwirkungen eine wichtige Rolle, wie namentlich die Anlockung der Samenfäden der Farne durch die vom Archegonium abgeschiedene Apfelsäure lehrt (Pfeffer). Auch Stereotropismen können in Betracht kommen, worauf z. B. die Beobachtung hinweist, daß die Spermatozoen der Küchenschabe durch Flächen angezogen werden.

Alle diese Reizwirkungen sind spezifischer Natur, sie machen einen Teil der sexuellen Affinität aus, d. h. der Wechselwirkung, durch die befruchtungsbedürftige Zellen verwandter Art nach erfolgter Begattung oder Besamung zu endgültiger Annäherung und Verbindung und zur Durchführung des Befruchtungsaktes veranlaßt werden.

Die Unmöglichkeit einer erfolgreichen Paarung zwischen Angehörigen verschiedener Arten kann auf instinktiver, vielfach durch den Geruchsinn vermittelter Abneigung oder auf Kopulationshindernissen mechanischer Art (sehr verschiedener Größe der Tiere, mangelnde Harmonie der Kopulationsorgane) oder aber auf dem Fehlen eben jener sexuellen Affinität beruhen. Im letzteren Fall kann außer dem mangelnden Chemo- und Stereotropismus die Undurchlässigkeit der Eihäute oder Mikropylen für artfremdes Sperma oder auch mangelnde Anziehung zwischen den Geschlechtskernen in Betracht kommen.

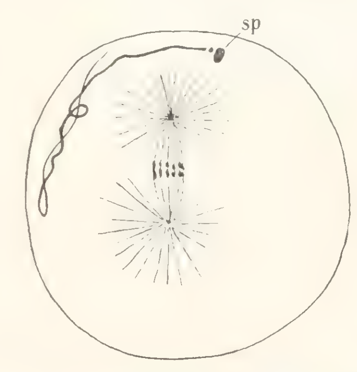


Fig. 11. Ei von Physa mit zentral gelegener erster Richtungsspindel. sp Spermakern. Nach Kostanecki und Wiercesjki.

Die instinktive Abneigung kann durch Domestikation gebrochen oder ebenso wie die mechanischen Schwierigkeiten durch künstliche Befruchtung überwunden werden (z. B. Begattung von weißen Mäusen durch Injektion von Rattensperma). Auch der Mangel einer sexuellen Affinität läßt sich in gewissen Fällen durch Veränderung der Konzentration oder der chemischen Zusammensetzung des Mediums unwirksam machen. Seeigeleier können z. B. bei Erhöhung der Alkallinität des Seewassers (Zusatz von NaOH) durch Sperma von Seesternen, Schlangensternen oder Haarsternen (Antedon) zur Entwickelung gebracht werden (Loeb, Godlewski), ja, es kann auf diese Weise sogar eine wirksame heterogene Befruchtung von Seeigeleiern durch das Sperma von Mollusken herbeigeführt werden (Kupelwieser).

1d) Verlauf der Befruchtung. Bei den Metazoen nimmt der Befruchtungs-

prozeß seinen Anfang mit dem Eindringen einer oder mehrerer Samenzellen in das Ei und schließt ab mit der Kopulation von Spermakern und Eikern. Das Eindringen erfolgt vielfach während der Metaphasen der ersten Reifungsteilung, sei es, daß die erste Teilungsfigur (1. „Richtungsspindel") noch im Zentrum des Eies (Fig. 11) oder schon in der Peripherie (Fig. 12) gelegen ist, seltener, z. B. bei den Seeigeln, nach vollkommener Durchführung der beiden Reifungsteilungen.

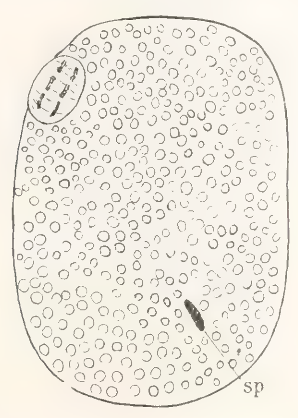


Fig. 12. Ei von Cyclops brevicornis mit peripher gelegener erster Richtungsspindel. sp stiftförmiger Spermakern.

Bei manchen Formen kommt das Eiplasma der eindringenden Samenzelle durch Vorwölbung eines Empfängnishügels entgegen (Fig. 13A eh). Bei den meisten Metazoen dringt normalerweise nur eine Samenzelle ein (Monospermie), und speziell bei dem klassischen Objekt der Befruchtungslehre, beim Seeigel, schützt sich das Ei im Moment des Eindringens des Spermakopfes dadurch gegen Ueberbefruchtung, daß eine für weitere Spermatozoen undurchdringliche Dottermembran oder Eihaut gebildet wird (s. unter 2b).

Im Gegensatz zur pathologisch verlaufenden Ueberbefruchtung steht die physiologische Polyspermie, bei der normalerweise mehrere Samenzellen in das Ei eindringen, aber allerdings nur ein Spermakern mit dem Eikern in Verbindung tritt. Eine derartige Mehrbefruchtung wird als regelmäßiges Vorkommnis bei Haien, Reptilien, Vögeln, als häufiges bei Amphibien, Insekten und Spinnen beobachtet. Es handelt sich im allgemeinen um große dotterreiche Eier, und man wird die Bedeutung des Vorganges darin zu suchen haben, daß durch eine Mehrheit der eindringenden Samenzellen die Aussicht des Eikerns, möglichst bald bezw. im richtigen Zustande mit einem Samenkern zusammenzutreffen, vergrößert wird.

Sehr häufig, so z. B. beim Seeigel, dringt vom Spermatozoon nur der vordere Teil, einschließlich des Mittelstückes, in das Eiplasma ein (Fig. 12, 13A), während der Schwanzfaden in der Eihülle (beim Seeigel in der Dotterhaut) stecken bleibt. In zahlreichen anderen Fällen, so bei Turbellarien, Gastropoden (Fig. 11) und manchen Wirbeltieren, z. B. bei der Fledermaus (Vesperugo), wird auch der Schwanzfaden in das Ei hineingezogen. Er ist dann als ein in Schlingen gelegter Faden noch während der Durchführung der ersten Richtungsteilung (Fig. 11), zuweilen aber, so bei der Fledermaus, noch während der

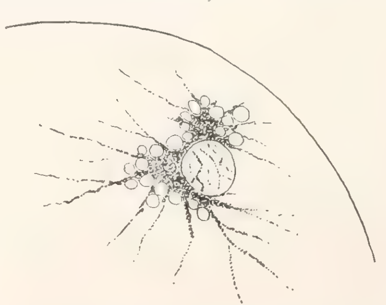


Fig. 14. Teilung des Spermozentrums bei Cyclops strenuus. Nach Rückert.

Annäherung der beiden Geschlechtskerne wahrzunehmen. Früher oder später fällt aber der eingedrungene Schwanzfaden ebenso wie das Spitzenstück der Resorption anheim, während das Cytoplasma des Kopfes und Mittelstückes so vollständig mit dem Eiplasma verschmelzen, daß sie nicht mehr als selbständige Gebilde zu erkennen sind. In der Regel ist also von der eingedrungenen männlichen Zelle nur noch der Spermakern (Fig. 13Ak) und das an Stelle des Mittelstückes zur Entfaltung kommende Spermo

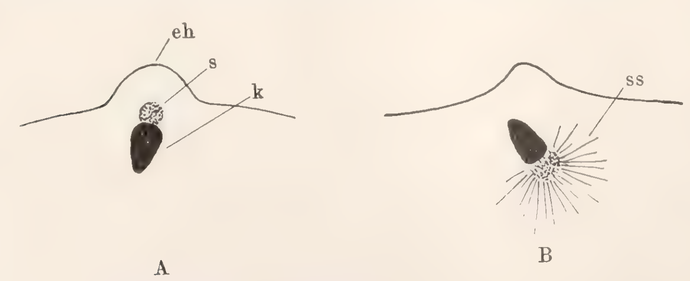


Fig. 13. Eindringen der Samenzelle im Seeigelei. eh Empfängnishügel, k Kopf, s Sphäre, ss Spermastrahlung. Nach Wilson und Matthews.

zentrum (s) wahrzunehmen. Dieses besteht entweder aus einem Centrosom (? dem vorderen der Spermatide Fig. 8 B bis D c.a, Fig. 11) oder scheinbar nur aus einer körnigen, dotterfreien, als Sphäre bezeichneten Plasmainsel (Fig. 13A s). Später tritt die das Centrosoma oder die Sphäre umgebende Spermastrahlung hervor, d. h. eine radiäre Anordnung der Plasmagranula und der Dotterkörnchen, die als Ausdruck einer orientierenden (zentrierenden) vom Spermozentrum ausgehenden Wirkung chemischer oder dynamischer Art aufzufassen ist (Fig. 13 B ss).

Während sich der eingedrungene männliche Apparat so dreht, daß das zuerst hinten gelegene Spermozentrum gegen das Eiinnere gerichtet ist (Fig. 13A und B), und sich mehr und mehr dem Eikern nähert, verliert der Spermakern allmählich seine längliche (kegel- oder stiftförmige) Gestalt, seine dichte Konsistenz und starke Färbbarkeit

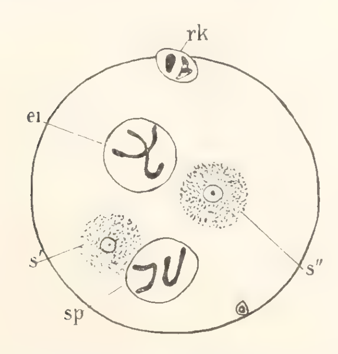


Fig. 15. Befruchtung des Ascaris-Eies. ei Eikern, rk Richtungskörper, s', s'' die beiden Spermozentren, sp Spermakern. Nach Boveri.



Fig. 16. Kernkopulation im Pterotrachea-Ei. rk Richtungskörper. Nach Boveri.

und nimmt mehr und mehr das Aussehen des Eikerns an (Fig. 15 sp). In der Regel zeigen die beiden Kerne zur Zeit der Kopulation annähernd die gleiche Größe und Beschaffenheit (Fig. 16), seltener, z. B. beim Seeigel weist der Spermakern noch während und nach der Kopulation eine geringere Größe und dichtere Konsistenz auf.

In früheren oder späteren Stadien der gegenseitigen Annäherung der beiden Kerne teilt sich das Spermozentrum und damit auch die Spermastrahlung (Fig. 14, 15 s',s'', 16) und, indem sich die beiden Kerne aneinanderlegen (kopulieren), kommt ein viergliedriges System zustande, das aus den beiden weiter auseinander gerückten Spermozentren und den zwischen ihnen gelegenen Geschlechtskernen besteht (Fig. 17).

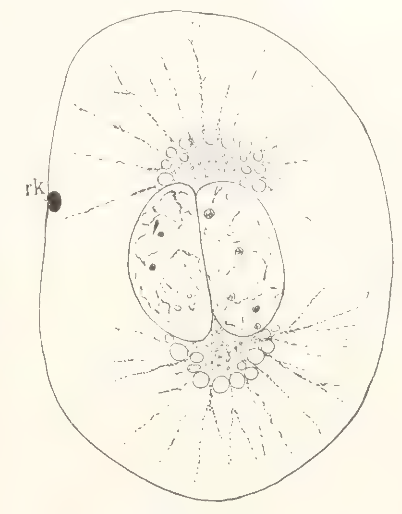


Fig. 17.* Kernkopulation bei Cyclops strenuus. rk zweiter Richtungskörper. Nach Rückert.

Die Vorbereitung der Kernsubstanz zur ersten Teilung des nunmehr doppelkernigen Keimes (der „ersten Furchungsteilung") macht sich schon während (Ascaris, Fig. 15) oder erst nach erfolgter Kopulation bemerkbar. Speziell bei Ascaris zeigen die Chromosomen der beiden Geschlechtskerne schon vor der Kopulation eine sehr weitgehende Ausbildung, und lassen die fundamentale Tatsache erkennen, daß die Chromosomen von Ei- und Spermakern bei der Kopulation die gleiche Zahl und das gleiche Aussehen zeigen (E. van Beneden).

Ebenso wie bei Ascaris in besonders deutlicher Weise die selbständige und gleichmäßige Vorbereitung der Geschlechtskerne zur ersten Teilung hervortritt, so läßt sich bei einer Reihe von Formen, insbesondere bei den Kopepoden und bei einer Schnecke (Crepidula) zeigen, daß die erste Teilung von beiden Kernsubstanzen auch selbständig durchgeführt wird, so daß nicht nur im Aequatorialplatten- und Dyasterstadium deutlich zwei Gruppen von Chromosomen, eine väterliche und eine mütterliche, zu unter-

scheiden sind, sondern auch bei der Rekonstitution der Tochterkerne keine einheitlichen Kerne, sondern Doppelkerne entstehen, die aus den beiden elterlichen Halbkernen oder Gonomeren zusammengesetzt sind (Fig. 18). Auch späterhin läßt sich die gleiche Erscheinung beobachten, so daß speziell in den frühen Embryonalzellen und in den Urgeschlechtszellen mit großer Regelmäßigkeit der Doppelbau der Teilungsfiguren und ruhenden Kerne hervortritt (Fig. 19, 20). Bei Cyclops kommt sogar noch in den Ovogonien und Spermatogonien der Doppelbau der Kerne darin zum Ausdruck, daß in den jungen Tochterkernen in jeder der beiden Kernhälften die Nucleolensubstanz selbständig zur Abscheidung kommt und erstere also einen symmetrischen binucleolären Bau zeigen, ein Zustand, der auch schon in den späteren Embryonalstadien (Fig. 20 st und ue) vorkommt und hier durch alle Übergänge mit dem ausgesprochenen Doppelbau (Fig. 18, Fig. 20 rechts oben) verbunden ist. Auch sind mehrere Fälle bekannt, in welchen auch noch die Spermatocyten I. Ordnung bei der Teilung doppelte Knäuelfiguren oder doppelte Kernspindeln erkennen lassen (Copepoden, Enten, Tauben, Fig. 21), ein deutlicher Hinweis darauf, daß die Selbständigkeit oder Autonomie der väterlichen und mütterlichen Kernsubstanz vom befruchteten Ei bis zu den Reifungsteilungen der Keimzellen fortbestehen kann.

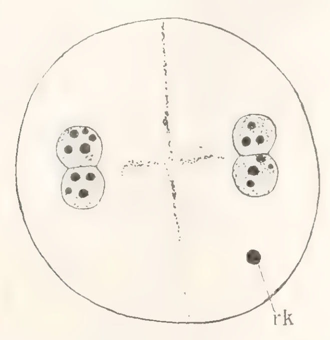


Fig. 18. Zweizellenstadium von Cyclops mit gonomer gebauten Kernen. rk zweiter Richtungskörper.

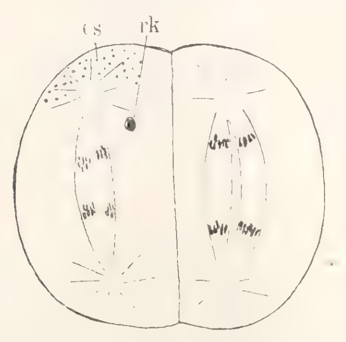


Fig. 19. Zwei- bis Vierzellenstadium von Cyclops mit Doppelspindeln. rk Richtungskörper, es Ektosomen.

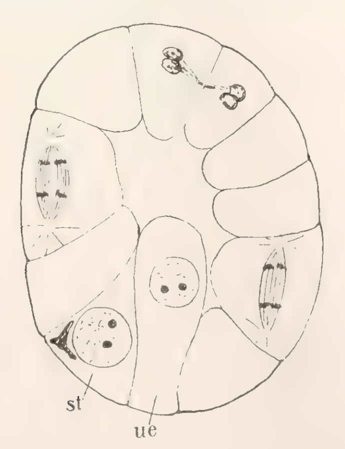


Fig. 20. Höheres Furchungsstadium von Cyclops mit Doppelspindeln (links), Doppelkernen (rechts oben) und binucleolären ruhenden Kernen (unten). st Stammzelle mit Ektosomenmasse, ue Urentodermzelle.

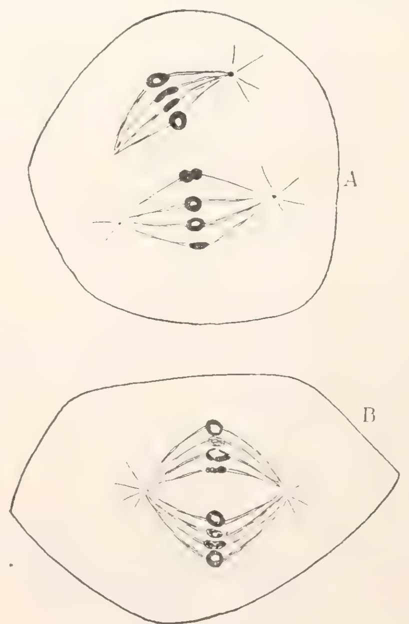


Fig. 21. Doppelspindeln in den Spermatocyten eines Taubenbastardes. Nach Guyer.

Zahlreiche Befunde sprechen, wie hier vorausgeschickt werden soll, dafür, daß sich auch bei den höheren Pflanzen eine Art von gonomerem Zustand längere Zeit forterhalten kann, insbesondere treten bei der ersten Teilung der Pollenmutterzellen namentlich

hybrider Pflanzen sehr häufig doppelte Teilungsfiguren (Doppelspindeln) auf. Auch bei verschiedenen niederen Organismen ist eine verspätete Vereinigung, bezw. eine dauernde Autonomie der Sexualkerne bekannt geworden, so bei Ascomyceten, Uredineen, Konjugaten, Amöbinen, Myxosporidien, und so kann die Befruchtung morphologisch betrachtet, nicht wie dies früher üblich war, als ein Verschmelzungsprozeß bezeichnet werden, vielmehr scheint es sich wenigstens in vielen Fällen in erster Linie um die Schaffung eines zweikernigen Zustandes zu handeln, um die Paarung zweier Kerne meist verschiedener Abkunft innerhalb einer einzigen Zelle.

Bei einer Reihe von Metazoen (Rotatorien, Entomostraken, zahlreichen Insekten) ist in bestimmten Generationen der Befruchtungsakt sekundär unterdrückt worden. Die Vermehrung durch unbefruchtete Eier wird in diesen Fällen als Parthenogenesis (Jungfernzeugung) bezeichnet (vgl. unter 2 b).

1e) Reifung und Befruchtung bei höheren Pflanzen und Einzelligen. Für die theoretische Beurteilung der Reifung und Befruchtung ist die Tatsache von größter Bedeutung, daß jedenfalls bei der überwiegenden Zahl der cellulär gebauten Organismen Prozesse nachgewiesen werden können, welche den Reifungs- und Befruchtungsvorgängen bei den Metazoen homolog zu setzen sind. Es wird zurzeit allgemein anerkannt, daß die Teilungen, welche im Embryosack der angiospermen Phanerogamen zur Bildung gewisser abortiver Zellen, der Synergiden und Antipoden (Fig. 22 sy, a), führen, in ihrem Ablauf mit den Reifungsteilungen der tierischen Fortpflanzungszellen eine große Übereinstimmung zeigen und mit diesen Prozessen auch in physiologischer Hinsicht auf eine Stufe zu stellen sind, und ebenso ist zuzugeben, daß dasselbe für die beiden Teilungsprozesse gilt, auf Grund deren die Pollenmutterzelle die vier Pollenkörner liefert. Auch findet der Befruchtungsakt der Metazoen in demjenigen der Angiospermen sein volles Gegenstück, nur daß bei letzteren die beiden generativen Kerne der Polenkörner „nackt", d. h. ohne von Cytoplasma oder anderweitigen Zellbestandteilen begleitet zu sein, in den Embryosack eintreten und vor allem auch nicht die Funktion zu haben scheinen, in die Eizelle einen Teilungsapparat einzuführen. Ein anderer Unterschied besteht darin, daß wenigstens in vielen Fällen (so bei den Lilien) eine doppelte Befruchtung stattfindet, indem sich der eine der generativen Kerne (Fig. 22 p′) mit dem Kern der Eizelle (oo), der andere (p″) mit dem durch Vereinigung der beiden Polkerne (ps, pi) entstandenen sekundären Embryosackkern vereinigt.

Auch die Teilungsprozesse, welche bei der Sporenbildung der Gefäßkryptogamen und Lebermoose auftreten, sind ihrem zellteilungsgeschichtlichen Verhalten nach den Reifunsvorgängen homolog, obwohl sie durch

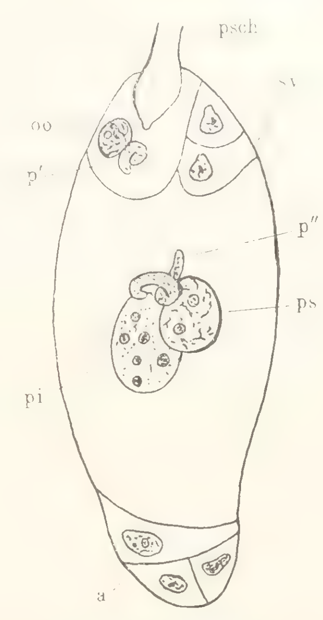


Fig. 22. Doppelte Befruchtung bei Lilien. psch Pollenschlauch, oo Eizelle, sy Synergiden, ps und pi oberer und unterer Polkern, a Antipoden, p′ p″ die beiden männlichen Kerne. Nach Guignard.

die ganze Zellenfolge der Gametophytengeneration von dem Befruchtungsakte getrennt sind. Und ebenso finden sich bei niederen Pflanzen (Braunalgen, Algenpilzen u. a.), sowie bei den Einzelligen Prozesse, welche den Reifungs- und Befruchtungsvorgängen der höheren Vielzelligen entsprechen.

Was insbesondere die Reifungsvorgänge der Einzelligen anbelangt, so zeigen sie in den einzelnen Abteilungen sehr verschiedene Bilder, die sich aber zwanglos in einer Reihe anordnen lassen. Bei manchen Formen liegen Teilungsakte vor, welche hinsichtlich ihrer Zweizahl und ihres Auftretens unmittelbar vor der Befruchtung sowie ihrem ganzen Verlaufe nach eine unverkennbare Ähnlichkeit mit der Ei- und Samenreife der Metazoen aufweisen (Vorreife mit Bildung von Richtungs- oder Reduktionskernen). So tritt bei den Heliozoen (Fig. 23) in jedem der beiden Gameten der Kern an die Peripherie und teilt sich hier zweimal unter Bildung je eines „Reduktionskerns". In ähnlicher Weise spielt sich bei den Infusorien, so bei Paramaecium

(Fig. 24), die Reifung in der Weise ab, daß sich der Mikronucleus (Geschlechtskern) jedes Paarlings zunächst zweimal unter Bildung lang ausgezogener, hantelförmiger Figuren teilt. Drei der Abkömmlinge gehen als Richtungskörper zugrunde, während der vierte sich abermals teilt und die beiden Geschlechtskerne, den stationären und den Wanderkern, liefert. Bei Paramäcium finden übrigens nicht bloß vor, sondern auch nach der Konjugation Teilungen statt, die in den Exkonjuganten zur Bildung abortiver Kerne führen und eine große Aehnlichkeit mit den Reifungsteilungen haben (Nachreife). Auch bei den Desmidiaceen und Zygnemaceen sind Vorgänge zu beobachten, die mit der Nachreife der Infusorien eine Aehnlichkeit haben.

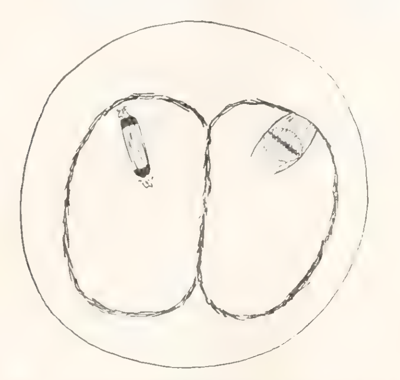


Fig. 23. Richtungskörperbildung bei Actinophrys (Heliozoon). Nach Schaudinn.

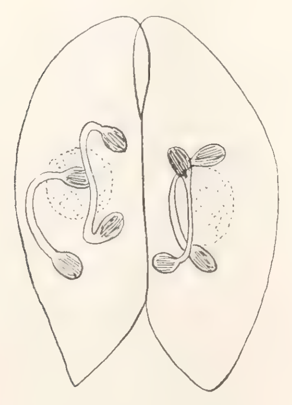


Fig. 24. Vorreife bei Paramaecium: in jedem Paarling zweimalige Teilung des Geschlechtskerns. Nach R. Hertwig und Maupas.

Etwas andere Bilder finden sich bei denjenigen Formen, bei welchen sowohl in der sexuellen als in der asexuellen Vermehrungsperiode typische multiple Zellvermehrungs- oder Sporenbildungsprozesse auftreten, indem das einzelne Individuum (bei der sexuellen Vermehrung der Gamont, bei der asexuellen der Agamont[1]), sei es auf dem Wege der multiplen Kernteilung, sei es unter Zerfall des Primärkerns, zumeist zahlreiche Kerne bildet und darnach in ebensoviel Teilindividuen oder Sporen, die Gameten oder Agameten, zerlegt wird. Bei solchen Formen können unmittelbar vor der Bildung der als Gameten dienenden Geißelsporen zwei Teilungsakte (Foraminiferen) oder nur einer (Allogromia) besonders akzentuiert sein und so an die Reifungsteilungen erinnern, oder es kann die eigentliche Gametenbildung durch unregelmäßige (gewissermaßen fakultative) Teilungsprozesse eingeleitet werden (Eimeria Schubergi) oder es treten überhaupt keine deutlichen Anklänge an die Reifungsprozesse hervor (Trichosphaerium). Hier liegt also eine ganze Reihe von Uebergangsstufen zwischen den Reifungsprozessen und der Sporenbildung vor, und da z. B. bei Trypanosoma die bei der Entwicklung der Makrogameten vorkommende Erzeugung abortiver Kerne bei der Mikrogametenbildung durch einen typischen Sporenbildungsprozeß substituiert wird, so liegt der Gedanke nahe, daß sowohl die Vorreife als die Nachreife der Protozoen als ein rudimentärer Sporenbildungsprozeß aufzufassen ist.

So gelangt man schließlich, im Hinblick auf die Gesamtheit der Befunde bei Gefäßkryptogamen, Algen, Pilzen und Einzelligen, zu der Auffassung, daß auch die Reifungsprozesse der Metazoen und Angiospermen gewissermaßen als phylogenetische Reminiszenzen an die Sporenbildungsprozesse niederer Formen betrachtet werden dürfen, eine Vorstellung, von welcher aus auch die nahezu universelle Verbreitung der Prozesse etwas verständlicher würde. Freilich wäre das zähe Festhalten an diesen Vorgängen kaum erklärbar, wenn ihnen nicht auch heute noch eine wichtige biologische Bedeutung bei den Fortpflanzungs- und vielleicht auch bei den Vererbungserscheinungen zukommen würde. wie dies beinahe von allen Biologen angenommen wird.

Was die Konjugationserscheinungen (Konjugation im weiteren Sinne) selber anbelangt, so kann die Verbindung zweier Individuen zu einer dauernden und totalen Verschmelzung der beiden Paarlinge oder Gameten und ihrer Kerne führen, wie dies wohl bei allen Flagellaten, Rhizopoden

[1]) Vielleicht empfiehlt es sich, die vielkernigen und vielzelligen Zustände, die die Gamonten und Agamonten vor ihrem Zerfall in Gameten oder Agameten erreichen, unter der Bezeichnung Auxonten zusammenzufassen.

und Sporozoen der Fall ist. Man spricht dann von einer Karyoplasmogamie oder Kopulation und nennt das Verschmelzungsprodukt eine Zygote. Oder es kann die Verbindung eine vorübergehende sein und nur einen Austausch von Kernen im Gefolge haben: dann liegt eine reine Karyogamie oder Konjugation im engeren Sinne vor. Dieser Fall ist bei den meisten Infusorien verwirklicht, insofern hier der Mikronucleus oder Geschlechtskern jedes Paarlings nach zweimaliger vorbereitender Teilung (Fig. 24) auf Grund eines dritten Teilungsvorganges (Fig. 25A) zwei generative Kerne liefert, den stationären Kern (st) und den Wanderkern (w). Der Wanderkern jedes Paarlings tritt in den anderen Paarling über und vereinigt sich mit dem stationären Kern des letzteren (Fig. 25B). Hierauf findet die Trennung der beiden Gameten statt.

Die Konjugationsvorgänge der Einzelligen zeigen noch in anderer Hinsicht mancherlei Verschiedenheiten, speziell auf den Unterschied von Isogamie und Anisogamie wurde bereits oben hingewiesen (1b). S. 896.

In einigen Fällen (Actinosphaerium u. a.) sind die Gameten Schwesterzellen, in anderen (Entamoeba) besteht der Befruchtungsakt sogar nur in der Verbindung von zwei Kernen, die aus dem einzigen Kern einer Zelle durch Teilung entstanden sind und vor ihrer Vereinigung noch vorbereitende Teilungen durchlaufen. Beide Befruchtungsmodi werden als Autogamie zusammengefaßt.

1f) Chromosomenverhältnisse. Im Hinblick auf die bedeutsame Rolle, die die Kerne der Geschlechtszellen augenscheinlich bei der Befruchtung und den an letztere geknüpften Vererbungsvorgängen spielen, ist die Frage nach dem Verhalten der Chromosomen (Chromatinschleifen) von besonderem Interesse, da diese Gebilde zu Beginn der Zellteilung offenbar die wichtigsten Kernsubstanzen in sich vereinigen und letztere von der Mutterzelle auf die Tochterzellen zu übermitteln berufen sind. Schließt man sich insbesondere der wohlbegründeten Anschauung an, daß bei allen Zellteilungsakten die Chromosomen, die zu Beginn einer Teilung aus dem „ruhenden" Kern hervorgehen, in direkter stofflicher Kontinuität mit denjenigen Chromosomen stehen, die nach Ablauf der vorangegangenen Teilung in die Bildung der Tochterkerne eingegangen waren, also gewissermaßen die nämlichen Individuen darstellen (Individualitätstheorie): so erhebt sich die Frage, in welches Verhältnis die Chromosomen der beiden Geschlechtskerne bei der Befruchtung zueinander treten, ob bei jedem Geschlechtsakt eine einfache Addition der Chromosomenindividuen stattfindet und wie gegebenenfalls eine solche von Generation zu Generation stattfindende Anhäufung von Chromosomenindividuen ausgeglichen wird.

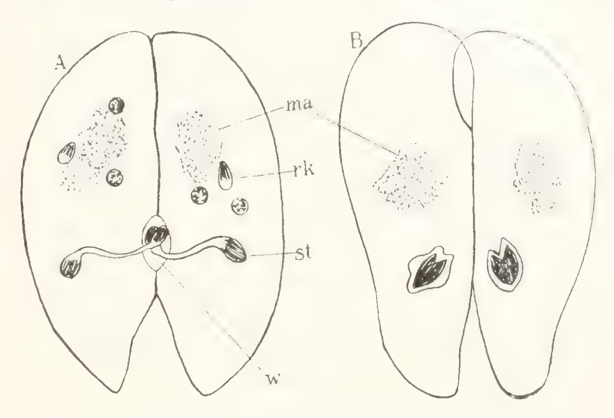


Fig. 25. Konjugation von Paramaecium. A dritte Teilung des Geschlechtskerns, Uebertritt der Wanderkerne. B Kernkopulation. rk zugrunde gehende Richtungskörper, ma die in Auflösung begriffenen Großkerne, st stationäre Kerne, w Wanderkerne. Nach R. Hertwig und Maupas.

Für die höheren Organismen gilt zunächst als erste Regel, daß die beiden miteinander kopulierenden Geschlechtskerne die gleiche Zahl von Chromosomen zur Entwickelung bringen. So kommen beim Pferdespulwurm bei der einen Rasse (Ascaris megalocephala bivalens) in jedem Geschlechtskern zwei (Fig. 15, 26F), bei der anderen (Ascaris megalocephala univalens) nur je ein einziges Chromosom zur Ausbildung. Indem sich die väterlichen und mütterlichen Chromosomen zu Beginn der ersten Furchungsteilung der Länge nach spalten und indem die Tochterhälften, vielfach immer noch deutlich in eine väterliche und eine mütterliche Gruppe gesondert, dizentrisch auseinanderweichen, wird jeder der beiden ersten Tochterzellen (Furchungszellen, Blastomeren) eine Zahl von Chromosomen zugewiesen, die der Summe der beiden im Kopulationsakt vereinigten Chromosomenzahlen entspricht, und das gleiche gilt naturgemäß auch für die folgenden Zellgenerationen. Es erhält sich also die durch den Kopulationsakt gebildete Chromosomenzahl, (Fig. 26G), welche als normale, nichtreduzierte, diploide oder somatische bezeichnet wird, in der Regel durch die ganze Embryonalentwickelung und meist

auch bei den späteren Teilungen fort und kommt insbesondere auch bei den Teilungen der Urgeschlechtszellen und weiterhin in denen der Spermatogonien und Ovogonien (Fig. 26 A) zum Vorschein.

Eine Ausnahme von der Regel bilden die Formen, die zwei verschiedene, durch ihren Chromosomenbestand gekennzeichnete Sorten von Spermatozoen zur Entwickelung bringen, z. B. diejenigen Hemipteren, bei welchen die eine

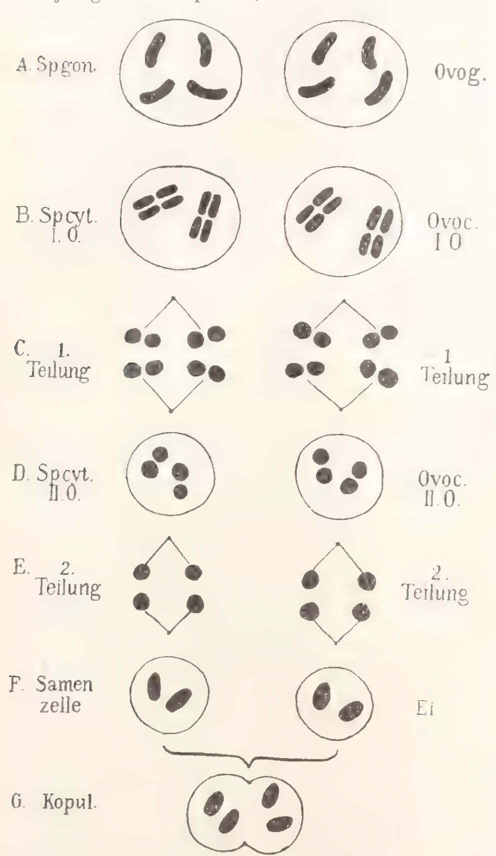


Fig. 26. Schematische Darstellung der Zahlenverhältnisse der Chromosomen in der Spermatogenese (links) und der Ovogenese (rechts).

Hälfte der Spermatozoen außer der halben (reduzierten) Zahl von typischen Chromosomen ein sogenanntes Heterochromosom oder X-Chromosom (im ganzen $\frac{n}{2} + X$), die andere kein solches (also $\frac{n}{2}$ Chromosomen) besitzen, während sämtliche Eizellen in gleicher Weise mit einem dem Heterochromosom homologen Element ausgestattet sind (also $\frac{n}{2} + X$ Chromosomen besitzen). In diesen Fällen kommen in 50 % aller befruchteten Keime ungleiche $\left(\frac{n}{2}\right.$ und $\left.\frac{n}{2} + X\right)$, in 50 % gleiche Chromosomenzahlen $\left(\frac{n}{2} + X\right.$ und $\left.\frac{n}{2} - X\right)$ zusammen. Aus ersteren gehen männliche, aus letzteren weibliche Individuen hervor.

Auch in den somatischen, insbesondere in den embryonalen und larvalen Geweben mancher Tiere sind wiederholt wechselnde, insbesondere zu geringe (unterzählige) Chromosomenzahlen beobachtet worden.

Eine zweite Regel gilt für die Samen- und Eimutterzellen (Spermatocyten und Ovocyten I. Ordnung) und, wie gleich hier hinzugefügt werden soll, in ähnlicher Weise für die Embryosack- und Pollenmutterzellen der Phanerogamen und die Sporenmutterzellen der Gefäßkryptogamen. Speziell in den erstgenannten Zellen ist die Zahl der komplexen, meist deutlich vierteiligen Chromosomen, welche in den Vorstadien der ersten Reifungsteilung zutage treten, also die Zahl der sogenannten Vierergruppen oder Tetraden und ihrer Homologa (Viererkugeln, Viererstäbchen, Doppelfäden, Doppelstäbchen, Gemini, Ringe, Kreuze) halb so groß wie die in den Spermatogonien und Ovogonien auftretende normale Zahl der Chromosomen. Dieses Verhältnis tritt namentlich in dem Stadium



Fig. 27. Synapsisstadium von Drosera. Nach Berghs.

der Diakinese hervor, wenn die bereits verkleinerten und verdichteten Chromosomen lose (meist wandständig) im Kernraum verteilt sind (Fig. 26 B). Indem ferner diese komplexen Elemente im Verlauf der beiden Reifungsteilungen je in vier einfacher gebaute Elemente von der gewöhnlichen Schleifen- oder Stäbchenform zerlegt werden (Fig. 26 C und E), erhält schließlich jede der reifen Geschlechtszellen die halbe, reduzierte oder haploide Zahl (Fig. 26 F).

Es findet also während der Reifung der Geschlechtszellen eine Reduktion der Zahl der Elemente (numerische Reduktion) statt und es wird durch diese, vor jedem Befruchtungsakt erfolgende Halbierung der normalen Zahl offenbar erreicht, daß durch die Befruchtung keine Anhäufung von Chromosomen zustande kommt, sondern daß die Chromosomenzahl von Generation zu Generation in den einander homologen Zelltypen konstant bleibt.

Was den genaueren Verlauf des Reduktionsprozesses und seine Deutung anbelangt,

so geht die Ansicht der überwiegenden Zahl von zoologischen und botanischen Forschern dahin, daß der Uebergang von der Normalzahl zu der halben Zahl in der Weise stattfindet, daß in den frühesten Stadien der ersten Reifungsteilung (nach der Ansicht vieler in dem Stadium des einseitig zusammengeballten Kernfadenknäuels, der Synapsis, Fig. 27) je zwei Chromosomen miteinander in eine enge Verbindung treten, so daß bivalente Chromosomen von der Zusammensetzung a + b, c + d ... entstehen. Indem sich die miteinander gekoppelten Chromosomen in Vorbereitung auf die folgenden Teilungsakte der Länge nach spalten, entstehen die meist vierteiligen Chromosomenkomplexe der Diakinese von der Zusammensetzung

$$\frac{a}{a}\Big|\frac{b}{b'}\quad\frac{c}{c}\Big|\frac{d}{d}\ldots$$

wo der Bruchstrich den Längsspalt andeutet. Die in der Diakinese (Fig. 26 B) hervortretende Halbierung der Chromosomenzahl ist also nicht als eine wirkliche numerische (etwa durch Resorption oder Rudimentation der Hälfte der Chromosomen entstandene), sondern zunächst nur als eine scheinbare Reduktion (Scheinreduktion, Pseudoreduktion) zu betrachten.

Die paarweise Koppelung oder Syndese der Chromosomen wird nun bald als eine Parallellagerung je zweier Elemente (Parallelkonjugation, Parasyndese), bald als eine Hintereinanderlagerung (endweise Konjugation, Metasyndese) aufgefaßt, die Syndese und folgende Längsspaltung würde also entweder nach dem Schema $\frac{a}{b}$, $\frac{\overset{a}{a}}{b}$ oder nach dem Schema a + b, $\frac{a}{\alpha} + \frac{\overset{b}{b}}{b}$ verlaufen. (Die letztere Annahme ist der Darstellung in Fig. 26 B zugrunde gelegt.)

In beiden Fällen wird meistens angenommen, daß die eine der beiden Reifungsteilungen insofern mit einer gewöhnlichen Kernteilung oder Aequationsteilung übereinstimmt, als durch sie die durch Längsspaltung erzeugten Spalthälften oder Tochterchromosomen voneinander geschieden werden, daß dagegen die andere eine Reduktionsteilung darstellt, d. h. einen Teilungsakt, bei welchem die Chromosomen ohne vorherige Längsspaltung und damit ohne vorherige Verdoppelung ihrer Zahl auf die Tochterzellen verteilt werden. Speziell wird angenommen, daß in der Reduktionsteilung die miteinander parasyndetisch oder metasyndetisch gekoppelten Chromosomen sich gegenseitig verabschieden und nach den beiden Polen auseinanderweichen:

$$\frac{a}{b}\qquad\frac{c}{d}$$

Die Gesamtwirkung der beiden Teilungsprozesse würde also die tatsächliche numerische Reduktion der Chromosomenindividuen sein.

Je nachdem die Reduktionsteilung im ersten oder im zweiten Teilungsakt erfolgt, wird von einer Präreduktion oder Postreduktion gesprochen.

Da der erste Teilungsvorgang bei den meisten tierischen und pflanzlichen Objekten Anklänge an die sogenannten heterotypische Mitose des Salamanderhodens, der zweite solche an den bei demselben Objekte beobachteten homöotypischen Modus zeigt, so wird auch von einem Ablauf der Reifung nach dem hetero-homöotypischen Schema gesprochen, wobei Parasyndese und Präreduktion als die zugrunde liegenden Einzelprozesse angenommen werden.

Nach einer gewissermaßen vermittelnden Auffassung (Faltungshypothese) würden die Vierergruppen in der Weise entstehen, daß sich je zwei Chromosomen zunächst metasyndetisch verbinden, daß aber die so gebildeten bivalenten Elemente sich in der Vereinigungsstelle umbiegen und ihre Schenkel, die Einzelchromosomen, auf diese Weise nebeneinander zu liegen kommen, so daß eine sekundäre Parasyndese zustande kommt.

Bei einigen Objekten (Kopepoden) darf es als nahezu sicher gelten, daß die im Laufe der Stammesgeschichte bei den meisten Tieren und Pflanzen erfolgte Zusammendrängung der beiden Teilungsprozesse noch nicht zur Unterdrückung eines der beiden Längsspaltungsprozesse und zur Einrichtung einer Reduktionsteilung geführt hat. Die metasyndetisch verbundenen Chromosomenpaare (bivalente Chromosomen) spalten sich daher zweimal hintereinander, es findet auch bei beiden Teilungsprozessen eine Verteilung nach dem Längsspalt statt und die reifen Geschlechtszellen erhalten also die volle Zahl der Chromosomen, wenn auch infolge ihrer paarweisen Koppelung in verkappter Form. Die endgültige Zahlenreduktion findet dann im Laufe der Embryonalentwickelung auf Grund einer vollkommenen Verschmelzung der beiden miteinander verbundenen Einheiten statt (Teleutosyndese).

Von vielen Forschern wird die in den Vorstadien der Reifung eintretende Syndese als eine Konjugation je eines väterlichen und eines mütterlichen Chromosoms gedeutet. Es würde sich also hier um einen wirklichen Geschlechtsakt oder um die bis zur Geschlechtszellenreife verzögerte letzte Etappe

des am Anfang der Keimbahn stehenden Befruchtungsprozesses handeln. Bei der Reduktionsteilung würden nach dieser Auffassung die miteinander vereinigten väterlichen und mütterlichen Elemente wieder voneinander gehen und auf verschiedene Zellen verteilt werden, eine Vorstellung, die in der Vererbungstheorie eine wichtige Rolle spielt (vgl. den Art. „Vererbung").

Für eine Konjugation je eines väterlichen und eines mütterlichen Elementes sprechen verschiedene Befunde, so besonders die Beobachtung, daß sich bei Hemipteren, Orthopteren und anderen Objekten unter den Chromosomen der Spermatogonien und Ovogonien Paare von gleich großen Elementen unterscheiden lassen (Fig. 28) und daß in den Spermatocyten und Ovocyten I. Ordnung die Syndese offenbar immer zwischen den beiden Elementen einer Größenabstufung erfolgt. Wofern es sich hier wirklich um konstante, den Chromosomen inhärente Größenunterschiede handelt und nicht etwa um solche, die auf einer heterochronen Entwickelung der Chromosomen beruhen, so können diese Erscheinungen in der Tat so gedeutet werden, daß jedem Chromosom des väterlichen Geschlechtskerns ein solches des mütterlichen morphologisch und physiologisch entspricht und daß bei der Syndese je zwei homologe Elemente miteinander verbunden werden, um bei der Reduktionsteilung wieder voneinander getrennt zu werden.

a

b

Fig. 28. Doppelte Chromosomengarnitur in den Ovogonien einer Wanze (Anasa); a in natürlicher Lage, b paarweise der Größe nach geordnet. Nach Wilson.

Indessen ist eine Uebertragung dieser Anschauungen auf andere Organismen nicht ohne weiteres möglich, denn es werden, wie oben erwähnt wurde (S. 900 Fig. 21), in nicht seltenen Fällen auch noch während der ersten Reifungsteilung, also nach vollzogener Syndese, Kerne und Kernteilungsfiguren mit ausgesprochenem Doppelbau gefunden, was auf eine über die Syndese hinaus fortdauernde Trennung der väterlichen und mütterlichen Kernsubstanzen schließen läßt.

Von Interesse sind die Chromosomenverhältnisse bei parthenogenetischen Eiern. Doch gehen hier die Angaben, zum Teil wohl infolge der Ungunst der Objekte, vielfach auseinander. Danach würde entweder die Reduktion unterbleiben, indem die eine Reifungsteilung unterdrückt wird (Artemia) oder beide Teilungen sich als Aequationsteilungen verhalten (Aphiden); oder die Reduktion wird durch nachträgliche Chromosomenverdoppelung (Lasius, Rhodites) bezw. durch Vereinigung des Eikerns mit dem zweiten Richtungskörper (Artemia, 2. Modus) in ihrer Wirkung kompensiert; oder es bleibt endlich die reduzierte Zahl während der Embryonalentwickelung erhalten und geht infolge Ausfalls der Reduktionsteilung auf die reifen Geschlechtszellen über (Formica-♂, Apis-♂). Aehnliche Widersprüche bestehen bis jetzt bezüglich der parthenogenetischen, apogamen und aposporen Entwickelung bei Pflanzen.

Bei künstlicher Parthenogenese (vgl. unter 2 b) bleibt in der Embryonalentwickelung, wie zu erwarten ist, die bei der Eireifung reduzierte Zahl erhalten. Die Ansicht, daß bei den Seeigeln die reduzierte Zahl während der Larvenentwickelung auf Grund einer „Autoregulation" zur Normalzahl zurückkehre (Delage), hat sich als irrtümlich herausgestellt (Boveri). Das gleiche scheint für die Batrachier zu gelten.

2. Theorie der Befruchtung Verhältnis zu anderen Lebenserscheinungen und biologische Bedeutung. 2 a) Verbreitung; Verhältnis zur asexuellen Vermehrung und Reifung. Eine Befruchtung im weiteren Sinne des Wortes kommt ursprünglich, wie man wohl sagen darf, als eine normale, periodisch wiederkehrende Lebensäußerung allen ein- und vielzelligen Organismen zu. Wo eine Befruchtung nicht nachweisbar oder wenigstens während eines sehr langen Zeitraums nicht zur Beobachtung gelangt ist, wie bei manchen Tieren mit parthenogenetischer Fortpflanzung (einem Muschelkrebse, Cypris reptans, und einigen Wasserflöhen der großen Alpenseen) oder bei Pflanzen mit dauernder parthenogenetischer (Chara crinita), dauernd apogamer (Alchemilla, Taraxacum, Thalictrum) oder dauernd vegetativer Vermehrung (Poa alpina, Pyramidenpappel), da liegen anscheinend sekundäre Verhältnisse vor.

Bei Bakterien und Cyanophyceen konnten bisher keine homologen Prozesse nachgewiesen werden. Speziell das Vorkommen von Sexualakten bei Cyanophyceen wird bestimmt in Abrede gestellt (E. Zacharias).

Die Befruchtungsprozesse zeigen eine gewisse äußere Aehnlichkeit mit nichtsexuellen Verschmelzungsprozessen, wie sie bei einigen Protozoen gelegentlich vorkommen. Bald handelt es sich dabei um die Bildung von

lockeren, durch Plasmabrücken hergestellten Verbänden (Assoziationen, Aggregationen), so bei nackten und einkammerigen Sarkodinen, bald um eigentliche Plasmaverschmelzungen ohne folgende Kernverschmelzung. Im letzteren Fall kann die Vereinigung ohne erkennbare physiologische Folgen sein (Plasmogamie bei Trichosphaerium, Pyxidicula Fig. 29, Heliozoen und anderen Sarkodinen) oder sie kann gelegentlich der Bewältigung größerer Nahrungskörper („Freßgesellschaften" der Heliozoen) oder in einem gewissen losen (fakultativen) Zusammenhang mit Vermehrungs- und Geschlechtsakten (Kettenbildung bei Gregarinen) zustande kommen. Ob ein genetischer Zusammenhang zwischen diesen Vorgängen und der Befruchtung besteht, ob insbesondere die ersteren die phylogenetische Wurzel für die Entstehung der sexuellen Fortpflanzung gebildet haben, kann nicht gesagt werden.

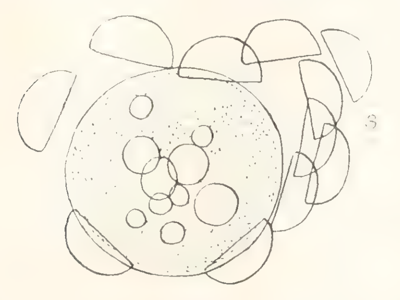


Fig. 29. Riesenindividuum einer Süßwasserthalamophore (Pyxidicula), durch Verschmelzung von 11 Individuen entstanden. s die leeren Schalen. Nach Doflein.

Bei den meisten cellulär gebauten Organismen, so besonders bei den Einzelligen, bei den höheren Pflanzen und bei vielen höheren Tieren, sind nicht alle Vermehrungs- oder Fortpflanzungsvorgänge mit Befruchtungsakten verbunden, vielmehr findet ein mehr oder weniger regelmäßiger Generationswechsel statt, d. h. auf eine Generation, welche die mit dem Befruchtungsprozeß verknüpfte geschlechtliche, sexuelle, zweielterliche oder amphigone Fortpflanzung (Amphigonie) ausführt, folgen eine oder mehrere Generationen, in welchen die Fortpflanzung ohne Befruchtungsakte, also auf ungeschlechtlichem, asexuellem, einelterlichem oder monogonem Wege (durch Monogonie) vor sich geht. So vermehren sich bei den Einzelligen in der Regel mehrere Generationen auf dem Wege der Monogonie (Schizogonie, ~~Amphigonie~~), bis wieder eine Fortpflanzung durch Amphigonie (Sporogonie, Gamogonie) erfolgt.

Um die Parallele zwischen den Vorgängen bei den Einzelligen durchführen und eine terminologische Uebereinstimmung herstellen zu können, wird man zweckmäßiger Weise und in teilweisem Gegensatz zu einigen Autoren (Lang) diejenigen Phasen des Zeugungskreises oder Fortpflanzungscyklus der Einzelligen, die zur Ausbildung von paarungsbedürftigen Zellen (Gameten) führen als Amphigonie oder Gamogonie, die Phasen dagegen, bei denen die Vermehrung nur durch Zweiteilung erfolgt oder bei denen Zwergzellen, die nicht der Konjugation bedürftig sind (Agameten, agametische Sporen), gebildet werden, als Monogonie oder Agamogonie bezeichnen. Vgl. auch M. Hartmann, Biol. Cbl., Bd. 24, 1904.

Bei den Vielzelligen kommen drei Formen des Generationswechsels vor: 1. Der primäre Generationswechsel, d. h. der Wechsel zwischen Amphigonie und primärer Monogonie oder besser primärer Monocytogonie. Unter letzterer ist zu verstehen ein offenbar sehr ursprünglicher Vermehrungsmodus, der, ebenso wie die Amphigonie, cytogener Art ist, d. h. durch einzelne, vom Elternorganismus losgelöste Fortpflanzungszellen vermittelt wird, bei welchem aber die Fortpflanzungszellen nicht befruchtungsbedürftig sind (z. B. Sporogonie der Gefäßkryptogamen). 2. Der regressive Generationswechsel (Heterogonie) oder Wechsel zwischen der Amphigonie und der sekundären, durch Rückbildung von Befruchtungsprozessen entstandenen Monocytogonie (Parthenogenesis, Pädogenesis), z. B. bei Cladoceren und Trematoden. 3. Der progressive Generationswechsel (Metagenesis) oder Wechsel zwischen der Amphigonie und der „vegetativen" Vermehrung durch Knospung, Quer- oder Längsteilung, z. B. bei Hydroidpolypen Salpen.

Ob man auch bei den Metazoen von einem primären Generationswechsel in dem Sinne reden darf, daß, ähnlich wie bei den Phanerogamen, das aus dem befruchteten Ei hervorgehende Individuum als die ungeschlechtliche Generation, die Zellgenerationen der Reifungsperiode als die vollkommen abortiv gewordene, in die ungeschlechtliche Generation einbezogene Geschlechtsgeneration (gewissermaßen als ein außerordentlich zurückgebildetes Prothallium) zu betrachten wären, ist sehr zweifelhaft. Die große Aehnlichkeit, welche z. B. bei den Kopepoden die Phase der Urgeschlechtszellenbildung mit der Reifungsperiode zeigt, darf vielleicht eher als ein Anzeichen dafür aufgefaßt werden, daß, im Fall ein abortiver Generationswechsel wirklich anzunehmen ist, der Einschnitt zwischen ungeschlechtlicher und Geschlechtsgeneration nicht in der Reifungsperiode, sondern bei der Entstehung der Urgeschlechtszellen anzunehmen ist. Jedenfalls ist zu betonen, daß der bekannte Generationswechsel bei Cölenteraten, Würmern, Bryozoen und Tunikaten grundsätzlich verschieden von demjenigen der Einzelligen und dem primären Generationswechsel der höheren Pflanzen ist, da bei den genannten Metazoen die sog. ungeschlechtlichen Generationen auf vege-

tativem Wege, d. h. von ganzen, meist aus mehreren Geweben entstammenden Zellkomplexen ihre Entstehung nehmen und sicher erst sekundär eingeschaltet sind, während bei den letztgenannten Organismen beide Generationen von mehr oder weniger selbständigen Einzelzellen (Konjuganten, Keimzellen, Sporen usw.) ausgehen.

Weniger übersichtlich als die Beziehungen des Befruchtungsaktes zum Generationswechsel scheinen die Zusammenhänge zwischen den Befruchtungs- und Reifungsvorgängen zu sein.

Bei den Reifungsteilungen der Einzelligen handelt es sich, wie erwähnt (S. 902), vermutlich um rudimentäre Sporenbildungsprozesse. Da nun die Vermehrung auf dem Wege der Sporenbildung (multiplen Teilung) in beiden Abschnitten des Fortpflanzungszyklus der Protozoen vorkommen kann (vgl. die Foraminiferen und Hämosporidien), so konnten sich auch jene rudimentären Sporenbildungsprozesse sowohl in der sexuellen als in der asexuellen Vermehrungsphase, also sowohl vor, als nach der Befruchtung erhalten (vgl. die Vor- und Nachreife der Infusorien). Ein notwendiger zeitlicher Zusammenhang zwischen Reifung und Befruchtung ist also nicht gegeben, wie besonders das Beispiel der Desmidiaceen und Zygnemaceen mit ihrer typischen Nachreife zeigt.

Bei den höheren Kryptogamen und bei den Phanerogamen besteht insofern ein Unterschied, als die Sporenbildungsprozesse der ersteren und die ihnen homolog zu setzenden Reifungsteilungen der Phanerogamen nur noch am Beginn der selbständig vegetierenden oder abortiv gewordenen Geschlechtsgeneration, des Gametophyten (Prothallium der Farne, Embryosack und Pollenkern der Angiospermen usw.), auftreten. Da nun bei der Sporenbildung bezw. Reifung die Zahl der Chromosomen auf die Hälfte reduziert wird und die reduzierte oder haploide Zahl sich in sämtlichen Zellen des Gametophyten forterhält, so kann auch gesagt werden, daß die Reifungsprozesse am Anfang der haploiden, der Befruchtungsakt am Anfang der diploiden Generation stehen.

Bei den Metazoen endlich gehen die Reifungsvorgänge unmittelbar dem Befruchtungsakte voran. Ob sie auch hier eine vollkommene abortiv gewordene Geschlechtsgeneration andeuten, ist nach dem obigen unsicher.

2b) Befruchtung und Entwickelungserregung. Die Wirkung des Befruchtungsaktes, die bei den Vielzelligen am meisten in die Augen fällt, ist die Auslösung der Eientwickelung, und so ergab sich zunächst die Auffassung, daß es sich sowohl bei der Befruchtung der Vielzelligen, als bei der Konjugation der Einzelligen um einen Verjüngungs- oder Belebungsprozeß handelt. Das durch zahlreiche aufeinanderfolgende Teilungsakte erschöpfte, mehr und mehr einem Zustand der Depression oder des stabilen Gleichgewichtes genäherte Protoplasma würde danach durch periodisch eintretende Befruchtungsakte immer wieder in einen labilen Zustand übergeführt und zu neuer Wachstums- und Teilungstätigkeit befähigt werden.

Diesen Anschauungen steht nun freilich die weite Verbreitung der Parthenogenese und vegetativen Vermehrung, insbesondere das Vorkommen rein parthenogenetisch und rein vegetativ sich fortpflanzenden Organismen gegenüber, auch sind gegen die Anwendung der Verjüngungstheorie auf die Protozoen verschiedene Einwände erhoben worden. Insbesondere ist hervorzuheben, daß in vielen Fällen auf die Konjugation nicht etwa eine erhöhte Teilungstätigkeit, sondern im Gegenteil ein längerer Ruhezustand der gebildeten Zygote folgt.

Auch die Erscheinung der Autogamie (s. S. 903) ist schwer mit der Theorie zu vereinigen und dasselbe gilt für die Ergebnisse mehrerer experimenteller Untersuchungen. So wurde z. B. bei einem Paramäciumstamm während dreier Jahre kein Konjugationsakt beobachtet (Jennings).

Gegenüber der Vorstellung, daß die Befruchtung einen für die fortdauernde Erhaltung der Wachstums- und Teilungsenergie unumgänglich notwendigen Prozeß darstelle, ergab sich also die Meinung, daß die hauptsächliche Bedeutung des Befruchtungsprozesses nicht in der Erregung der Eientwickelung, sondern in einer Substanz- und Qualitätenmischung liege. Die Befruchtungsvorgänge haben danach deshalb eine so allgemeine Verbreitung, weil sie die Möglichkeit einer periodisch sich wiederholenden Amphimixis, d. h. einer Mischung individuell verschiedener Plasmasorten und und damit auch individuell verschiedener Vererbungstendenzen gewähren (vgl. 2c).

Wenn nun die Eier der Vielzelligen trotzdem im allgemeinen befruchtungsbedürftig, d. h. so beschaffen sind, daß sie sich ohne Befruchtung nicht entwickeln, so handelt es sich hier nach dieser zweiten Ansicht um eine Sicherheitseinrichtung, durch welche eben der periodische Eintritt der amphimiktischen Prozesse verbürgt wird. Das Ei kann sich nicht vorher entwickeln, ehe nicht ein entwickelungserregender Faktor, eben der Befruchtungsakt, hinzutritt, dieser Faktor ist aber derselbe, durch den gleichzeitig auch die Amphimixis eingeleitet wird.

Worin bestehen nun die Hemmungseinrichtungen und in welcher Weise werden

diese durch den Befruchtungsprozeß beseitigt? Worin liegt also schließlich die entwickelungserregende Wirkung der Befruchtung?

Der Nachweis, daß mindestens bei der überwiegenden Mehrzahl der Metazoen die bei der ersten Furchung wirksamen Teilungszentren von dem durch die Samenzelle eingeführten Spermozentrum abstammen (Fig. 13 bis 17), hat zu der Auffassung geführt, daß die Hemmung der Eientwickelung darauf beruhe, daß der Teilungsapparat des Eies selber, das Ovozentrum, schon vor oder erst nach dem Ablauf der Reifungsteilungen außer Aktivität gesetzt wird und daß die entwickelungserregende Wirkung der Samenzelle in der Einführung eines neuen Teilungsapparates bestehe (Boveri).

Verschiedene Beobachtungen weisen aber darauf hin, daß das Verhältnis verwickelter ist. Zunächst ist die Tatsache von Bedeutung, daß in vielen Fällen schon allein durch das Eindringen der Samenzelle, ehe es noch zur Entfaltung ihres Teilungsapparates kommt, die vorher zum Stillstand gekommene erste Reifungsteilung und in deren Gefolge auch die zweite zum Ablauf gebracht wird. Diese Tatsache und ebenso gewisse Experimente zeigen, daß dem Ei durch die Befruchtung eine allgemeine Disposition zur Teilung verliehen wird, ohne daß zunächst das Spermozentrum direkt beteiligt ist.

H. E. Ziegler führte eine unvollkommene Durchschnürung befruchteter Seeigeleier mittels eines Wollfadens in der Weise aus, daß die eine Hälfte den Sperma-, die andere den Eikern enthielt. Während sich nun in ersterer Spermozentrum und Spermakern regulär teilt, wird auch in der zweiten Hälfte, offenbar als Wirkung einer vom Befruchtungsakt ausgehenden Induktion, ein wiederholter Anlauf zu Teilungsvorgängen gemacht.

Auch die Möglichkeit, durch Agenzien verschiedener Art künstlich eine parthenogenetische Entwickelung hervorzurufen, ließ die Zusammenhänge zwischen der Einführung des Spermozentrums und der Eientwickelung als weniger einfach erscheinen, und so wurde es notwendig, namentlich an der Hand der Beobachtungen über künstliche Parthenogenese, eine genauere Analyse der Entwickelungserregung vorzunehmen.

Eine künstliche Parthenogenese ist bei den Eiern sehr verschiedener Tiere unter Anwendung chemisch-physikalischer, thermischer und mechanischer Reize erzielt worden. Als Objekte kamen hauptsächlich Seeigel und Seesterne, ferner Anneliden (Chaetopterus, Polynoë u. a.), Mollusken (Mactra u. a.), Frösche und Fische (Petromyzon) in Betracht. Bei einigen Formen, namentlich bei den Seesternen, liegt eine Neigung zu fakultativer parthenogenetischer Entwickelung vor, das Ei befindet sich also hier in besonders starkem Maße in einem labilen Gleichgewichtszustand.

Als Agenzien dienten hauptsächlich Meerwasser, das durch Zusatz von Salzlösungen ($MgCl_2$, KCl, NaCl, $CaCl_2$, $MnCl_2$) hypertonisch gemacht worden war, ferner Zuckerlösungen, Harnstoffe, Säuren (CO_2, Fettsäuren), Alkalien (NaOH), verschiedene Gifte und Narkotika (Strychnin, Chloroform u. a.), Spermaextrakt und verschiedene Sera, ferner erhöhte und erniedrigte Temperatur und mechanische Reizung durch Schütteln, Bürsten oder Einstechen. Von großer theoretischer Bedeutung sind einige kombinierte Methoden gewesen, so die Verbindung von Fettsäuren mit hypertonischem Seewasser (Loeb) und die von Tannin und Ammoniak (Delage).

Bei einzelnen Formen, z. B. bei Mollusken, ist bis jetzt nur die Wirkung von hyperalkalinischem und hypertonischem Seewasser, bei anderen, z. B. den Seesternen, nur die von Säuren mit Erfolg erprobt worden. Bei Seeigeln zeigen Alkalien, Fettsäuren und fettlösende Substanzen (Benzol, Amylen) annähernd die gleiche Wirkung.

Je nach dem Objekt und je nach dem angewandten Agens ist auch das Stadium, bis zu dem die Entwickelung getrieben wird, verschieden. Während in einzelnen Fällen nur unregelmäßige Ansätze zur Entwickelung gemacht werden oder höchstens die ersten Segmentierungsvorgänge zustande kommen, nimmt in anderen Fällen die Entwickelung einen durchaus normalen Verlauf. So hat zuerst Loeb bei Behandlung der Seeigeleier mit $MgCl_2$ die Entwickelung bis zum Pluteusstadium durchgeführt, später gelang es Delage bei Einwirkung von Tannin und Ammoniak und geeigneter Nachbehandlung eine vollkommene Metamorphose bei Seeigeln und Seesternen zu erzielen und Bataillon konnte bei seinen an Batrachiereiern vorgenommenen Anstichversuchen in einzelnen Fällen Kaulquappen zur Entwickelung bringen.

Im Falle eines unvollständigen Entwickelungsverlaufs kommt die Störung in einem abnormen Verhalten der Chromosomen und des achromatischen Teilungsapparates und in einer unregelmäßigen Zellzerklüftung zum Ausdruck (Fig. 30). Insbesondere können sich außer der im Zusammenhang mit dem Eikern auftretenden Teilungsfigur an verschiedenen Stellen des Eiplasmas überzählige Strahlungen (Cytaster) ausbilden, in deren Mittelpunkt ebenso wie in den Polen der Teilungsfigur, vielfach färbbare Körper auftreten. Die Ansichten gehen darüber aus-

einander, ob letztere de novo gebildete Centrosomen, oder nur Substanzanhäufungen darstellen, die durch Verschmelzung der zentralen Enden der Strahlen entstehen.

Im Falle einer vollständig normalen Entwickelung spielt sich insbesondere auch derjenigen Vorgang in typischer Weise ab, der bei vielen Formen (Seeigeln, Seesternen, Anneliden) das Signal für die vollzogene Befruchtung und Entwickelungserregung bildet, nämlich die Abhebung oder wenigstens deutliche Differenzierung der äußersten Lamelle des Eies in Gestalt der Dottermembran. Auch bezüglich der Zahl der Chromosomen der Furchungsteilungen finden sich, wie bereits erwähnt wurde (S. 906), die zu erwartenden Verhältnisse.

Aus dem gesamten Tatsachenmaterial, das die Untersuchungen über Normalbefruchtung und künstliche Parthenogenese, über die Entwickelung befruchteter eikernloser Eifragmente (Merogonie) und überbefruchteter (di- und polyspermbefruchteter) Eier geliefert haben, haben sich nun gewisse Anschauungen bezüglich des Wesens der Entwickelungserregung ergeben.

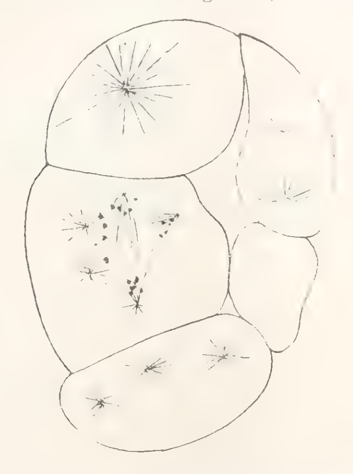


Fig. 30. Unbefruchtetes Seeigelei nach $4\frac{1}{2}$-stündiger Behandlung mit $MgCl_2$ (3,5%) und $1\frac{2}{3}$-stündigem Aufenthalt in Seewasser. Nach Morgan.

Zunächst lag es nahe, wenigstens die ersten Erscheinungen, nämlich die Abhebung der Dottermembran und das Wiedererwachen einer gewissen Disposition zur Teilung im Ei, als eine Reizwirkung mehr allgemeiner Art aufzufassen, welche ebensogut durch die Samenzelle wie durch irgendwelche Agenzien hervorgerufen werden kann (Boveri). Es könnte sich dabei um eine durch den Reiz ausgelöste Kontraktion, um die Elimination von Flüssigkeiten und im Zusammenhang damit um die Abgabe von Exkreten handeln, wodurch das Ei gewissermaßen gereinigt, seine Aktivität wiedererweckt und die oberflächliche Plasmalamelle durch die abgeschiedenen, unter Wasseraufnahme aufquellenden Substanzen abgehoben wird (Bataillon). Die Auslösung der eigentlichen Eiteilung würde dann auf eine zweite spezielle Wirkung der Samenzellen zurückzuführen sein, nämlich auf die Einführung eines organisierten Gebildes, des Spermozentrums (Boveri), mag nun wirklich das Zentrosom des letzteren ein eigentliches, mit dem Zentrosom der unreifen Samenzelle in Kontinuität stehendes Teilungsorganellum sein oder mag es sich nur um ein Stoffaggregat handeln, das in dem aktiv werdenden Spermozentrum zur Zeit seiner Aktivität zur Abscheidung kommt. Im Fall der künstlichen Parthenogenese wäre daran zu denken, daß durch die Reizwirkung das nach den Reifungsteilungen im Ei zurückgebliebene Ovozentrum wieder aktiviert wird oder daß irgendwelche andere, normalerweise inaktiv bleibende Zentren als Cytaster oder künstliche Astrosphären in Wirksamkeit treten.

Es ist versucht worden, diese allgemein reizphysiologischen Vorstellungen zu einer physikalisch-chemischen (kolloidchemischen) Theorie der Befruchtung weiterzubilden. Wenn die Zellteilungs- und damit die Eientwickelungsprozesse, wie angenommen wird (Loeb, Delage), einen Wechsel von Gerinnungs- und Verflüssigungsvorgängen, Koagulation und Liquefaktion, Wechsel von Gel- und Solzustand bedeuten, und wenn diese Prozesse ein gebundenes System bilden, derart, daß die Auslösung des Anfangsprozesses die Abwickelung der übrigen zur Folge hat, so könnte nach Delage die Wirkung sowohl der Samenzelle als der künstlichen Agentien als die Auslösung eines initialen Koagulations- und Liquefaktionsprozesses gedacht werden, von denen der erstere in der Abhebung der Dottermembran, der letztere in der Auflösung der Kernmembran zum Ausdruck kommt. Nach Loeb dagegen würde die Entwickelungserregung durch Sperma, Säuren, Alkalien oder fettlösende Substanzen aus zwei oder eigentlich drei Akten anderer Art bestehen. Erstens werden Spaltungsvorgänge ausgelöst, insbesondere wird die dicht unter den oberflächlichen Lamellen gelegene Protoplasmaschicht gelöst oder „cytolysiert" (im Fall der normalen Befruchtung unter der Wirkung eines vom Spermium mitgebrachten „Lysins") und dadurch die Dottermembran abgehoben. Diese Spaltungsvorgänge haben zweitens Oxydationen im Gefolge, sei es durch Oxydasenbildung, sei es durch Lieferung oxydablen Materials, und endlich bilden die Oxydationen den Ausgangspunkt für die Synthese von Eiprotoplasma in

Nuclein und damit für die Teilungsvorgänge. Inwieweit durch die Hypothese Loebs die Zusammenhänge in richtiger Reihenfolge zum Ausdruck gebracht sind, läßt sich zurzeit nicht sagen, auch ist hervorzuheben, daß für die durch mechanische Eingriffe bewirkte künstliche Parthenogenese damit vor der Hand keine befriedigende Erklärung gegeben wird.

2c) Befruchtung und Vererbung. Die engen Beziehungen des Befruchtungsaktes zu den Vererbungsvorgängen fallen bei den Vielzelligen ohnes weiteres in die Augen: denn nur durch die Befruchtung können ja die väterlichen Vererbungstendenzen in das Anlagenmaterial des jungen Organismus eingeführt und nur auf dem Wege der Befruchtung können offenbar die in der äußeren Erscheinung hervortretenden Anlagenmischungen zustande kommen. Angesichts dieses Zusammenhanges ist denn auch, wie bereits erwähnt, die Lehre begründet worden, daß die eigentliche und allgemeinste Bedeutung der Befruchtungsvorgänge in der Amphimixis, d. h. in der Vermischung zweier individuell verschiedener Vererbungstendenzen liegt (Weismann).

Die Bedeutung der Amphimixis ihrerseits kann dann nach verschiedenen Richtungen hin gesucht werden. Entweder könnte der Zweck dieses Vorganges im Ausgleich von Störungen, in der Unterdrückung minder günstiger Variationen durch Einführung „frischen Blutes", allgemeiner gesagt, in der Nivellierung von Unterschieden und in der Erhaltung der Artkonstanz, gelegen sein (Darwin, H. Spencer, O. Hertwig), oder es könnte sich um die in der Selektionstheorie geforderte Akkumulierung und Stärkung günstiger Anlagen (Darwin), oder endlich um eine immer wiederholte Entstehung neuer Anlagenkombinationen handeln (Weismann). Nach Weismann würde die Hauptbedeutung der Amphimixis und damit überhaupt der sexuellen oder amphigonen Fortpflanzung in der letztgenannten Richtung liegen. Die Amphimixis ist nach ihm die Hauptquelle der erblichen Variationen, sie hat das Material an individuellen Unterschieden zu schaffen, mittels dessen die Selektion neue Arten schafft (vgl. den Artikel „Vererbung").

Die Vermischung zweier individueller Vererbungssubstanzen beruht nun nach einer fast allgemeinen Ansicht auf einer Verbindung von väterlichen und mütterlichen Substanzen. Die Annahme, daß etwa durch den Befruchtungsakt dem Ei nur bestimmte Energieformen mitgeteilt werden, dürfte wohl zurzeit nur von wenigen Forschern vertreten werden.

Weiterhin ist die Anschauung weit verbreitet, daß nicht sämtliche Substanzen des Eies und der Samenzellen in gleicher Weise bei der Uebertragung der erblichen Eigenschaften beteiligt sind, sondern daß es auf Grund einer Arbeitsteilung nur bestimmte Teile der Fortpflanzungszellen sind, von deren besonderer Konstitution die äußeren Eigenschaften der Nachkommen, bezw. die in letzteren hervortretenden Merkmalsmischungen abhängig sind. In diesen besonderen Substanzen würden also, wie man sagt, die Erbanlagen lokalisiert sein, es kommt ihnen ein Prinzipat oder gar Monopol bezüglich der Uebermittelung und Verbindung der elterlichen Eigenschaften zu, sie stellen die eigentliche Vererbungssubstanz, das Idioplasma oder Keimplasma dar.

Vielerlei Gründe sind insbesondere zugunsten der Anschauung angeführt worden, daß speziell der Kern und die bei der Teilung aus ihm hervorgehenden Chromosomen die eigentlichen Vererbungsträger darstellen (O. Hertwig, Strasburger, Weismann). Hier sind zunächst alle die Tatsachen zu nennen, die den Kern als das eigentlich organisatorische, bei allen stoffbildenden und formgestaltenden (synthetischen, formativen) Zellprozessen wirksame Zentrum erscheinen lassen, und ebenso der Prozeß der indirekten Kernteilung (Karyokinese, Mitose), dessen Bedeutung darin zu liegen scheint, daß die Kernsubstanzen in quantitativer und qualitativer Hinsicht möglichst genau auf die beiden Tochterzellen verteilt werden. Noch unzweideutiger scheinen gewisse Einzelheiten des Befruchtungsprozesses selber zu sein, so die Beobachtung, daß mindestens bei einigen Angiospermen (Lilien) die generativen Pollenkerne vollkommen nackt, d. h. ohne jeden Cytoplasmabelag in den Embryosack eintreten, daß bei den Metazoen die miteinander kopulierenden Geschlechtskerne in der Regel die gleiche Masse und Struktur besitzen und dieselbe Zahl von Chromosomen zur Ausbildung bringen, während die miteinander vereinigten Zelleiber oder Cytoplasmen eine sehr ungleiche Masse aufzuweisen pflegen, und endlich, daß die Reifungsteilungen anscheinend einen Apparat darstellen, durch den eine Summierung speziell der Kernsubstanzen vermieden werden soll. Endlich scheint von ausschlaggebender Bedeutung ein von Boveri ausgeführtes Experiment zu sein, wonach bei Seeigeln die Befruchtung eikernloser Eifragmente durch artfremdes Sperma zur Bildung von Larven mit rein väterlichen Eigenschaften führt. Dieses Ergebnis ist offenbar so zu deuten, daß das Ei deswegen keinen Einfluß auf die Ausbildung der Larvencharaktere

gehabt hat, weil ihm eben die Kernsubstanz fehlte.

Es kann noch die Frage erhoben werden, welche der verschiedenen Kernsubstanzen in stofflicher Kontinuität von Zellgeneration zu Zellgeneration und von den Eltern auf die Kinder übertragen wird und demnach als eigentliche Vererbungssubstanz in Betracht kommt.

Eine früher fast allgemein verbreitete Ansicht weist diese Rolle dem Chromatin zu, also der in Körnchen- oder Brockenform auftretenden, färbbaren Substanz des ruhenden Kernes, die nach den ersten Beobachtungen vorzugsweise am Aufbau der Chromosomen beteiligt zu sein schien und vielfach mit den im Kern chemisch festgestellten Nucleinen (Nucleoproteiden) identifiziert wurde (Chromatinerhaltungshypothese). Viele Gründe sprechen aber dafür, daß das feinwabige (alveolär gebaute) Grundplasma des Kerns, im wesentlichen also das sogenannte Linin oder Achromatin, die eigentliche aktive Substanz des Kernes darstelle und daß auf ihr die stoffliche Kontinuität der ruhenden Kerne und der Chromosomen der aufeinander folgenden Zellgenerationen beruhe (Achromatinerhaltungshypothese).

Im Gegensatz zu der Lehre von dem Vererbungsmonopol des Kerns mehren sich neuerdings die Stimmen zugunsten der Anschauung, daß auch dem Cytoplasma der Fortpflanzungszellen ein Anteil an dem Zustandekommen der Vererbungserscheinungen zukommt. So fand Godlewski, daß bei der Befruchtung von eikernlosen Fragmenten von Seeigeleiern mit dem Samen eines Haarsternes (Antedon) die Embryonen das sogenannte primäre Mesenchym, also ein ausschließlich der mütterlichen Art zukommendes Merkmal zur Entfaltung bringen, und ferner ergab sich, daß bei den Eiern verschiedener Tiere (Mollusken, Anneliden, Ascidien u. a.) die Entfernung bestimmter Teile des Eiplasmas des unreifen Eies einen Ausfall bestimmter Organe der Larven hervorruft, was darauf hinzuweisen scheint, daß in jenen Teilen des Eiplasmas die Anlage des betreffenden Organes „lokalisiert" (das Organ selbst „präformiert") sei. Beide Beobachtungen konnten nicht wohl anders gedeutet werden, als daß auch dem Eiplasma ein Anteil an den spezifischen, von Generation zu Generation sich regelmäßig abspielenden Formbildungsprozessen und folglich an den Vererbungserscheinungen zukomme. Und wenn in einzelnen Fällen schon im unreifen Ei sichtbare Differenzierungen in Gestalt bestimmt lokalisierter Körnchenansammlungen wahrzunehmen sind, die bei der Embryonalentwickelung den Ausgangszellen ganz bestimmter Organe zugeteilt werden (organbildende Substanzen), oder wenn bei anderen Formen im Ei und im Plasma der Samenzellen färbbare Gebilde von übereinstimmender Beschaffenheit auftreten, die also von beiden Seiten her im befruchteten Keim zusammentreten (Mitochondrien, Chondriosomen, Plastochondrien), so lag die Vorstellung nahe, daß diese cytoplasmatischen Substanzen die Träger und Uebermittler ganz bestimmter Qualitäten darstellen, so wie dies von einigen Seiten für die einzelnen Chromosomenindividuen angenommen wird. So vertreten denn zahlreiche Forscher die Ansicht, daß bei der Vererbung beide Hauptbestandteile der Zelle, Kern- und Cytoplasma, in ungefähr gleicher Weise beteiligt sind und daß die Vererbung darauf beruhe, daß beide Substanzen mit ihrem gegenseitigen Stoffwechsel übertragen werden (Verworn, Loeb, Rabl u. a.).

Manche von den Beobachtungen, die von der einen wie von der anderen Seite als Beweise herangezogen werden, haben sich bei näherer Betrachtung als nicht ganz entscheidend erwiesen, immerhin bleibt aber eine Reihe eindeutiger Befunde bestehen und es sind daher verschiedene Versuche gemacht worden, die verschiedenen, scheinbar sich ausschließenden Ergebnisse miteinander zu vereinigen und die ursprüngliche Fragestellung: Kernmonopol oder gleiche Beteiligung von Kern- und Zellplasma? durch eine andere zu ersetzen. So hat Boveri die Resultate bei seinem eigenen Bastardierungsversuch und bei demjenigen Godlewskis durch die Annahme miteinander in Einklang zu bringen versucht, daß während der ersten Periode der Eientwickelung die Konstitution des Eiplasmas maßgebend ist und die Chromosomen nur durch gewisse generelle Eigenschaften wirksam sind, und daß erst in einer zweiten Periode die Chromosomen durch ihre spezifischen Eigenschaften zur Geltung kommen.

Mag nun diese oder eine andere Hilfsannahme richtig sein, jedenfalls weist manches darauf hin, daß die Anteile der beiden Hauptbestandteile der Fortpflanzungszellen an der Befruchtung und Vererbung weder bei sämtlichen Organismen, noch bei allen Einzelvorgängen und Einzelphasen der embryonalen und postembryonalen Entwickelung die gleichen sind. Es ist also vorläufig nicht möglich, das Verhältnis dieser Anteile auf eine einheitliche, für alle Organismen gültige Formel zu bringen.

Literatur. *Zur Einleitung:* ***O. Hertwig,*** *Das Problem der Befruchtung und der Isotropie des Eies. Eine Theorie der Vererbung. Jena 1884.* — ***R. Hertwig,*** *Ueber Befruchtung und*

Konjugation, Verh. d. Zool. Ges. 1892. — **Th. Boveri**, *Zellen-Studien, Heft 6, Jena 1907.* — Zu 1a: **Th. Boveri**, *Die Entwickelung von Ascaris megalocephala mit besonderer Rücksicht auf die Kernverhältnisse, Festschr. f. Kupffer, Jena 1899.* — **Buchner**, *Die Schicksale des Keimplasmas der Sagitten usw., Festschr. f. R. Hertwig I. Bd., Jena 1910.* — **V. Haecker**, *Die Keimbahn von Cyclops, Arch. f. mikr. An. 49. Bd., 1897.* — **M. Hasper**, *Zur Entwickelung der Geschlechtsorgane von Chironomus, Zool. Jb. (An.) 31. Bd., 1911.* — **O. Hertwig**, *Vergleich der Ei- und Samenbildung bei Nematoden, Ebenda 36. Bd., 1890.* — **F. Meves**, *Ueber Struktur und Histogenese der Samenfäden des Meerschweinchens, Ebda., 54. Bd., 1899.* — **E. B. Wilson**, *The Cell in Development and Inheritance, 2. ed., New York and London 1900.* — Zu 1b: **W. Waldeyer**, *Die Geschlechtszellen in O. Hertwig's Handbuch der Entwickelungslehre 1. Bd., 1. Teil, Jena 1906.* — Zu 1c: **E. Godlewski**, *Untersuchungen über die Bastardierung der Echiniden- und Crinoidenfamilie, Arch. Ent.-Mech. 20. Bd., 1906.* — **O. Hertwig**, *Die Zelle und die Gewebe, Jena 1893.* — **Derselbe**, *Allgemeine Biologie, 3. Aufl., Jena 1909.* — **R. Leuckart**, *Artikel „Zeugung" in Wagners Handwörterbuch der Physiologie Bd. 4, Braunschweig 1853.* — **J. Loeb**, *Vorlesungen über die Dynamik der Lebenserscheinungen, Leipzig 1906.* — Zu 1d: **Th. Boveri**, *Zellenstudien, Heft 2 u. 6, Jena 1888 und 1907.* — **V. Haecker**, *Ueber das Schicksal der elterlichen und großelterlichen Kernanteile, Jen. Zeitschr. 37. Bd., 1902.* — **O. Hertwig**, *Beiträge zur Kenntnis der Bildung usw. des tierischen Eies, I. Morph. Jahrb. 1. Bd., 1875.* — **E. Korschelt und K. Heider**, *Lehrbuch der vergleichenden Entwickelungsgesch., Allg. Teil, Jena 1902 bis 1910.* — **J. Rückert**, *Ueber das Selbständigbleiben der vät. u. mütt. Kernsubstanz usw., Arch. mikr. An. 45. Bd., 1895.* — **E. van Beneden**, *Recherches sur la maturation de l'oeuf, la fécondation etc., Arch. Biol. Bd. 4, 1883.* — **O. van der Stricht**, *La formation des deux globules polaires etc. chez Thysanozoon, Arch. Biol. Bd. 15, 1898.* — **E. B. Wilson und A. P. Matthews**, *Maturation fertilization and polarity in the Echinoderm egg., Journ. Morph. Bd. 10, 1895.* — Zu 1e: **O. Bütschli**, *Gedanken über die morphologische Bedeutung der sogenannten Richtungskörperchen, Biol. Cbl. 4. Bd., 1885.* — **F. Doflein**, *Lehrbuch der Protozoenkunde 3. Aufl., Jena 1912.* — **V. Haecker**, *Ueber weitere Uebereinstimmungen zwischen den Fortpflanzungszellen der Tiere und Pflanzen, Biol. Cbl. 17. Bd., 1897.* — **Derselbe**, *Allgemeine Vererbungslehre, Braunschweig 1911.* — **M. Hartmann**, *Die Fortpflanzungsweisen der Organismen usw., Biol. Cbl. 1903.* — **R. Hertwig**, *Mit welchem Rechte unterscheidet man geschlechtliche und ungeschlechtliche Fortpflanzung? Sb. Ges. Morph. Phys., München 1899.* — **Derselbe**, *Ueber Kernteilung usw. von Actinosphaerium Eichhorni. Abh. K. Bayer. Akad. Wiss. 2. Kl., 19. Bd., 1898.* — **F. Schaudinn**, *Neuere Forschungen über die Befruchtung der Protozoen, Verh. D. Zool. Ges. 1905.* — **E. Strasburger**, *Ueber periodische Reduktion der Chromosomenzahl usw., Biol. Cbl. Bd. 14, 1894.* — Zu 1f: **Th. Boveri**, *Zellenstudien, III. Jen. Zeitschr. 24. Bd., 1890.* — **V. Grégoire**, *Cinèses de maturation Cell., Tome 22, 1905 u. Tome 26, 1910.* — **V. Haecker**, *Die Chromosomen als angenommene Vererbungsträger. Erg. u. Fortschr. Zool. 1. Bd., 1907.* — **Derselbe**, *Allgemeine Vererbungslehre, Braunschweig 1911.* — **E. Korschelt und K. Heider**, *Lehrbuch der vergleichenden Entwickelungsgeschichte, Allgemeiner Teil, Jena 1902 bis 1910.* — **Th. H. Montgomery**, *A study of the chromosomes etc., Trans. Am. Phil. Soc. Bd. 20, 1901.* — **Derselbe**, *Chromos. in the spermatogenesis etc., Ebenda Bd. 21, 1906.* — **E. Strasburger**, *Chromosomenzahlen, Plasmastrukturen, Vererbungsträger und Reduktionsteilung, Jahrb. wiss. Bot. Bd. 45, 1908.* — **G. Trinci**, *L'evoluzione storica del problema della riduzione etc. Archivio An. Embr. Bd. 7, 1908.* — **F. Vejdovski**, *Neue Untersuchungen über die Reifung und Befruchtung, Prag 1907.* — **E. B. Wilson**, *Studies on chromosomes I. bis V., J. Exp. Z. Bd. 2 bis 6, 1905 bis 1909.* — **H. von Winiwarter**, *Recherches sur l'ovogénèse etc. des Mammifères, Arch. Biol. V., 17, 1900.* — Zu 2a: *Außer den hinter 1f genannten Schriften.* — **Ch. J. Chamberlain**, *Alternation of generations in animals from a botanical standpoint, Bot. Gaz. Bd. 39, 1905.* — **V. Haecker**, *Ueber vorbereitende Teilungsvorgänge bei Tieren und Pflanzen, Verh. Dtsch. Zool. Ges. 1898.* — Zu 2b: **E. Bataillon**, *Le problème de la fécondation etc. Arch. Zool. Exp. (5), T. 6, 1910.* — **Th. Boveri**, *Das Problem der Befruchtung, Jena 1902.* — **Derselbe**, *Zellenstudien 6, Jena 1907.* — **Y. Delage**, *Mehrere Arbeiten in Arch. Zool. Exp. (3), Bd. 7, 9 und 10 und (4) Bd. 7, 1899 bis 1908.* — **E. Godlewski**, *Das Vererbungsproblem im Lichte der Entwickelungsmechanik betrachtet, Leipzig 1909.* — **O. Hertwig**, *Das Problem der Befruchtung und der Isotropie des Eies, Jena 1889.* — **R. Hertwig**, *Ueber die Entwickelung des unbefruchteten Seeigeleies, Festschr. f. Gegenbaur, Leipzig 1896.* — **R. Kostanecki**, *Cytologische Studien an Eiern von Mactra, Arch. mik. An. Bd. 64, 1907.* — **J. Loeb**, *Verschiedene Arbeiten im Amer. Journ. Phys. Bd. 3 bis 6, 1899 bis 1906.* — **Derselbe**, *Ueber den chemischen Charakter des Befruchtungsvorganges usw., Leipzig 1908.* — **T. H. Morgan**, *The Action of Salt-Solutions etc., Arch. Entw. Mech. Bd. 8, 1899.* — **E. B. Wilson**, *Experimental Studies in Cytology I. bis III., Arch. Entw. Mech. Bd. 12 bis 13, 1901.* — Zu 2c: **Th. Boveri**, *Ergebnisse über die Konstitution der chromatischen Substanz usw., Jena 1904.* — **Derselbe**, *Zellenstudien, Heft 6, Jena 1907.* — **R. Demoll**, *Zur Lokalisation der Erbanlagen, Zool. Jahrb. (Allg. Z.) 30. Bd., 1910.* — **R. Fick**, *Betrachtungen über die Chromosomen usw., Erg. An. u. Phys., 1905.* — **E. Godlewski**, *Die Vererbungssubstanz im Lichte der Entwickelungsmechanik betrachtet, Leipzig 1909.* — **V. Haecker**, *Allgemeine Vererbungslehre, Braunschweig 1911 (Kap. 14).* — **O. Hertwig**, *Der Kampf um die Kernfragen der Entwickelungs- und Vererbungslehre, Jena 1909.* — **F. Meves**, *Die Chondriosomen als Träger erblicher Anlage, Arch. mikr. An. 72. Bd., 1908.* — **C. Rabl**, *Ueber „organbildende*

Substanzen" usw., Leipzig 1906. — **A. Weismann**, *Amphimixis oder die Vermischung der Individuen, Jena 1891.*

V. Haecker.

Beilstein

Friedrich Konrad.

Geboren am 1. März 1838 in Petersburg, wo er seit 1866 Professor am Technologischen Institut war und am 18. Oktober 1906 starb, hat sich ein besonderes Verdienst erworben durch Herausgabe seines groß angelegten Handbuches der organischen Chemie, das in vorzüglicher Anordnung die Beschreibung sämtlicher organischer Verbindungen mit genauen Literaturangaben enthält und noch immer von neuem durch Ergänzungsbände vervollständigt wird. Aus der Göttinger Schule hervorgegangen, hat Beilstein sich in Fühlung mit Geuther, Fittig und Hübner besonders der organischen Chemie zugewandt und diese durch zahlreiche Untersuchungen, namentlich im Gebiete der aromatischen Verbindungen, bereichert. Seine Schrift „Anleitung zur quantitativen Analyse" hat sich gut eingeführt. Ein ausführlicher, von Hjelt geschriebener Nekrolog (Ber. **40** 5041) gibt ein gutes Bild des Lebens und Wirkens Beilsteins.

E. v. Meyer.

Bell

Sir Charles.

1774 bis 1842 in London. Er kommt hier nicht als berühmter Chirurg in Betracht, sondern wegen seiner physiologischen Arbeiten. Seine 1811 als Ergebnis jahrelanger Studien erschienene Schrift An idea of a new anatomy of the brain: submitted for the observations of his friends enthält bereits die erste Nachricht von der Entdeckung über die verschiedenen Funktionen der Wurzeln der Rückenmarksnerven, eine Entdeckung, die Bell dann ein Jahrzehnt später in dem berühmten Vortrag in der Royal Society unter dem Titel On the nerves. Giving an account of some experiments on their structure and functions, which lead to a new arrangement of the system veröffentlichte und an die sich weitere in den Jahren 1822, 1823, 1826 in den Philosophical Transactions publizierte Abhandlungen anschlossen. Bell stammte aus Donn in Monteath (Schottland), studierte unter Leitung seines älteren, gleichfalls berühmten Bruders John Bell, gab schon als Student in Edinburg anatomische Tafeln heraus, ging später nach London, wurde hier 1824 Professor der Anatomie und Chirurgie am College of Surgeons und war seit 1828 kurze Zeit Professor der Physiologie an der Londoner Universität.

Literatur. *Biogr. Lex. Herausg. von* **Hirsch** *und* **Gurlt.**

J. Pagel.

Beneden

Eduard van.

Geboren am 5. März 1846 zu Löwen; gestorben am 28. April 1910 zu Lüttich. Er ist der Sohn Pierre Joseph van Benedens. Er studierte in Leyden und bekam auch dort eine Professur. Er publizierte eine Reihe von vorzüglichen Abhandlungen auf dem Gebiete der mikroskopischen Anatomie und Histologie und wirkte bahnbrechend auf dem Gebiete der Entwickelungsgeschichte. Seit 1880 gab er mit van Bambeke die Archives de Biologie heraus, die einen sehr guten Namen haben. Seine Reise nach Brasilien und La Plata brachten ihm reiche Ausbeute, an deren Bearbeitung eine Reihe von namhaften Forschern mitwirkten.

Von seinen Arbeiten seien erwähnt: Recherches sur la composition et la signification de l'oeuf basées sur l'étude de son mode de formation et des premiers phénomènes embryonnaires, Bruxelles 1870; Recherches sur l'évolution des Grégarines, Bullet. de l'Acad. royale de Belgique 1871; La maturation de l'oeuf, la fécondation et ses premieres phases du développement embryonnal des mammifères d'après des recherches faites chez le lapin, Bruxelles 1875; Contribution à l'histoire de la vésicule germinative et du premier noyau embryonnaire, Bullet. d'Acad. d. Belgique 1876; Contribution au dévellopement embryonnaire des Téléostéens, Ebenda 1877; Recherches sur la maturation de l'oeuf et ladivision cellulaire, Gand 1884. Mit Neyt: Nouvelles recherches sur la fécondation et la division mitotique chez l'Ascaride mégalocéphale, Leipzig 1887.

Literatur. *Nekrolog im Archiv d. Biol. 1910.*

W. Harms.

Beneden

Pierre Joseph van.

Geboren am 19. Dezember 1809 in Mecheln; gestorben am 8. Januar 1894 in Löwen. Er studierte Medizin, um sich dann aber nach seiner Promotion ganz der Zoologie zu widmen. Er wurde 1831 Konservator des Naturhistorischen Museums in Löwen, 1845 Professor der Zoologie in Gent, ging aber schon im folgenden Jahre als Professor der Zoologie und Paläontologie nach Löwen zurück. Sein Forschungsgebiet umfaßte hauptsächlich die niederen Tiere, so die marine Fauna der belgischen Küste, namentlich die Bryozoen, Mollusken und Cölenteraten, zu deren entwicklungsgeschichtlicher Kenntnis er durch mehrere Arbeiten beigetragen hat. Sehr eingehend hat er sich mit den Eingeweidewürmern der Fische und auch der höheren Tiere beschäftigt und namentlich versucht, ihren Entwickelungszyklus festzustellen. Er ist es auch gewesen, der den wahren Parasitismus von dem Kommensalismus und dem Mutualismus abtrennte und so eine schärfere Definition dieser Vorgänge schuf. Auch auf paläontologischem Gebiete verdanken wir ihm einige Arbeiten, so über die fossilen Cetaceen, die er mit Gervais zusammen bearbeitet hat. Er

schrieb Zoologie médicale (mit Gervais), Paris 1859, 2 Bde.; Iconographie des helminthes ou des vers parasites de l'homme, Löwen 1860; Ostéographie des cétacés vivants et fossiles (mit Gervais), Paris 1868 bis 1877; La vie animale et ses mystères, Brüssel 1863; Les fouilles au trou des Nutons de Furforz, Brüssel 1865; Les chauves-souris de l'époque du mammouth et de l'époque actuelle, London 1871; Die Schmarotzer des Tierreiches, Leipzig 1876.

Literatur. *Manifestation en l'honneur de M. le professeur van Beneden Gent 1877.*

W. Harms.

Bentham

George.

Botaniker. Geboren am 22. September 1800 zu Plymouth, lebte von 1814 bis 1826 im südlichen Frankreich, wo er sich mit der dortigen Flora sowie der der Pyrenäen beschäftigte. Nach England zurückgekehrt, widmete er sich vor allem der Bearbeitung von Sammlungen außereuropäischer Pflanzen, so z. B. jener, die die Horticultural Society zusammenbrachte, und vieler anderer. Sein umfangreiches Herbar schenkte er im Jahre 1854 dem Staate, welches nebst den Sammlungen von W. Hooker den Grundstock des späteren Kew-Herbariums bildete. 1861 wurde er Präsident der Linnean Society und starb, ohne je ein öffentliches Amt bekleidet zu haben, zu London am 10. September 1884. Bentham war einer der bedeutendsten Pflanzenkenner und hat zahlreiche ausgezeichnete, wenn auch in der morphologischen Auffassung nicht immer glückliche monographische und floristische Arbeiten verfaßt. Unter den ersteren seien genannt Monographien der Labiaten (1832 bis 1836), der Polemoniaceen (1845) und der Scrophulariaceen (1864), diese beiden für De Candolles Prodromus. Unter den Floren sind hervorzuheben die Bearbeitung der Leguminosen für Martius' Flora Brasiliensis (1859 bis 1862), die Flora Hongkongensis (1861) und die Flora Australiensis (7 Bände 1863 bis 1878), zu der Ferdinand von Müller die Sammlungen und zahlreiche Manuskriptbemerkungen geliefert hatte. Sein Hauptwerk sind die gemeinsam mit D. Hooker verfaßten Genera Plantarum ad exemplaria imprimis in herbariis Kewensibus servata definita (3. Bände London 1862 bis 1883), an dem ihm der größte Anteil gebührt und worin eine außerordentliche Fülle von Material bearbeitet ist.

Literatur. *Urban in Ber. d. Deutsch. Bot. Gesellsch. Bd. II, 1884, S. 16.*

W. Ruhland.

Benzolgruppe.

1. Allgemeines und Isomerieverhältnisse. 2. Konstitutionsermittelung und Substitutionsregelmäßigkeiten. 3. Uebergänge zwischen aromatischen und aliphatischen Verbindungen. 4. Der Steinkohlenteer. 5. Benzolkohlenwasserstoffe 6. Halogensubstitutionsprodukte. 7. Nitrokörper 8. Amine nebst Diazokörpern und Hydrazinen. 9. Azo-, Azoxy- und Hydrazoverbindungen. 10. Phenylhydroxylamin. 11. Sulfosäuren. 12. Phenole. 13. Chinone. 14. Alkohole, Aldehyde und Ketone. 15. Säuren. 16. Verschiedenes.

1. Allgemeines und Isomerieverhältnisse. Die Benzolgruppe bildet den größten und wichtigsten Bestandteil der aromatischen Reihe. Ihre Stammsubstanz, das Benzol C_6H_6 ist der Typus eines aromatischen Kohlenwasserstoffs; seine Konstitution ist daher in dem Artikel „Aromatische Reihe" erläutert; es wird dort gezeigt, daß die Benzolmolekel durch einen Ring von sechs Kohlenstoffatomen gebildet wird, die in eigentümlicher Weise miteinander verknüpft sind und je ein Wasserstoffatom binden

CH / CH CH / CH CH / CH oder schematisch

Durch Ersatz der Wasserstoffatome des Benzols — es können 1—6 Wasserstoffatome substituiert werden — durch andere Atome oder Radikale gelangt man zu einer fast unendlichen Reihe von Derivaten. Während durch die Substitution eines Wasserstoffatoms durch ein bestimmtes Radikal stets ein und dasselbe Monoderivat gebildet wird, gibt der Eintritt zweier Substituenten in den Benzolkern Anlaß zu Isomerieen, und zwar sind, wie die Theorie in Uebereinstimmung mit den Tatsachen ergibt, drei isomere Biderivate des Benzols möglich. Man unterscheidet die drei Isomeren der Einfachheit halber durch die Präfixe ortho-, meta- und para- oder abgekürzt o-, m- und p-. Man schreibt also o-Dichlorbenzol, m-Dinitrobenzol, p-Chlornitrobenzol

Cl, Cl (o-); NO_2, NO_2 (m-); Cl, NO_2 (p-)

Auch bei dreifacher Substitution hat man drei verschiedene Stellungen zu unterscheiden

X X X

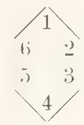
X X

X X X

X

v = vicinal a = asymm. s = symmetrisch

Noch einfacher ist es, die Stellung der Substituenten durch Zahlen anzugeben, indem man die Kohlenstoffatome mit 1—6 numeriert:



Dann ist o-Dinitrobenzol 1.2-Dinitrobenzol, s-Trichlorbenzol 1.3.5-Trichlorbenzol.

2. Konstitutionsermittelung und Substitutionsregelmäßigkeiten. Die Konstitutionsermittelung der einfachen Benzolabkömmlinge gelingt, nachdem für eine Anzahl Benzolderivate die Zugehörigkeit zur Ortho-, Meta- oder Parareihe ein für allemal auf kompliziertem Wege erwiesen ist, meist ohne Schwierigkeit dadurch, daß man die unbekannte Substanz mit Hilfe möglichst glatter und einfacher, eine Umlagerung ausschließender Reaktionen in einen Stoff von bekannter Konstitution umwandelt. Häufig gestattet auch schon die Bildungsweise der betreffenden Verbindung einen ziemlich sicheren Schluß auf ihre Konstitution. Es hat sich nämlich ergeben, daß die Substitution nach bestimmten Regeln verläuft, z. B. wenn man Chlorbenzol weiter substituiert, so entstehen beinahe ausschließlich o- und p-Derivate, also o- und p-Dichlorbenzol, o- und p-Chlornitrobenzol usw.; eine Substitution in der m-Stellung erfolgt fast gar nicht. Gerade umgekehrt verhält sich das Nitrobenzol: Beim Ersatz eines weiteren Wasserstoffatoms entstehen ganz überwiegend m-Derivate, also m-Dinitrobenzol, m-Chlornitrobenzol. Die Stellung des neu eintretenden Substituenten wird mithin durch die Natur des im Kern bereits vorhandenen bedingt, und zwar hat man zwei Klassen von Substituenten zu unterscheiden. Ebenso wie das Chloratom lenken den neu eintretenden Substituenten in o- oder p-Stellung auch noch folgende häufigen Radikale: Halogen (Cl, Br, J), Alkylrest (CH_3, C_2H_5), Hydroxyl- und Alkoxylgruppe (OH, OCH_3), Aminogruppe (NH_2, $N(CH_3)_2$); der Nitrogruppe entsprechend verhalten sich der Sulforest (SO_3H), die Carboxyl- und Carbonylgruppe (COOH, CHO, $COCH_3$), der Nitrilrest (CN). Es ist ferner bemerkenswert, daß die Substituenten der erstgenannten Klasse die weitere Substitution erleichtern, die der zweiten dagegen diese erschweren, d. h. also Chlorbenzol wird leichter als Benzol chloriert, nitriert, sulfuriert usw., Nitrobenzol dagegen schwerer. — Es ist bisher nicht gelungen, die obigen Substitutionsregeln aus der Natur des Benzolkerns durch Aufstellung einer geeigneten Formel restlos zu erklären. Dagegen gibt folgende (mnemotechnische) Regel die beobachteten Tatsachen gut wieder: Alle Gruppen, deren Wasserstoffverbindung sich leicht zu der um ein Sauerstoffatom reicheren Säure oxydieren läßt, sind Substituenten der zweiten Klasse.

3. Uebergänge zwischen aromatischen und aliphatischen Verbindungen. Die Verbindung zwischen den Benzolderivaten und den Körpern der aliphatischen Reihe wird durch eine Reihe von Synthesen und Abbaureaktionen hergestellt: So entsteht z. B. beim Durchleiten von Acetylen durch glühende Röhren Benzol, beim Erhitzen von Aceton mit verdünnter Schwefelsäure unter Wasserabspaltung 1. 3. 5-Trimethylbenzol (Mesitylen)

CH ≡ CH, CH ≡ CH, CH ≡ CH (Acetylen) ⟶ Benzol (Ring aus 6 CH)

Acetylen — Benzol

CH_3—CO—CH_3 (3 Moleküle) ⟶ Mesitylen (Ring C—CH—C—CH—C—CH mit drei CH_3)

Aceton — Mesitylen

Andererseits kann auch der Benzolring unter Bildung aliphatischer Substanzen gesprengt werden; so entsteht durch energische Reduktion von Benzol mit Jodwasserstoff Hexan C_6H_{14}, durch energische Oxydation mit Chlorsäure eine halogenhaltige Ketonsäure mit offener Kette, die β-Trichloracetylacrylsäure, CCl_3 CO CH=CH COOH.

4. Der Steinkohlenteer. Die Hauptquelle für die Gewinnung aromatischer Substanzen bildet der Steinkohlenteer. Das Vorkommen einiger Benzolderivate in der Natur — Benzoesäure, Bittermandelöl usw. — spielt eine verschwindende Rolle gegenüber dieser reichen Fundgrube, die das Ausgangsmaterial für die unübersehbare Zahl der im Laboratorium und in der Technik dargestellten Benzolderivate liefert. Als Steinkohlenteer bezeichnet man die flüssigen Bestandteile, die bei der trockenen Destillation von Steinkohle entstehen; er ist eine schmierige übelriechende Masse, die durch suspendierten Kohlenstoff schwarz gefärbt ist. Er besteht überwiegend aus aromatischen Substanzen, die sich ihrer chemischen Natur nach in indifferente, saure und basische

Körper einteilen lassen. Zu den indifferenten gehören in erster Linie die aromatischen Kohlenwasserstoffe, Benzol und seine Homologen, sowie Naphtalin, Fluoren, Anthracen, Phenanthren; saure Bestandteile sind das Phenol und die Kresole, basische Anilin, Pyridin, Chinolin u. a. Die Trennung dieser verschiedenen Substanzen erfolgt in erster Linie durch fraktionierte Destillation, wobei man gewöhnlich vier Fraktionen unterscheidet: 1. Vorlauf; 2. Leichtöl (bis 200⁰ siedend); 3. Schweröl (bis 250⁰) und 4. Anthracenöl (über 250⁰). Den Rückstand bildet das nicht unzersetzt destillierbare Pech, eine zähe Masse höchst komplizierter Zusammensetzung, die nicht weiter verarbeitet wird. Aus den einzelnen Fraktionen entfernt man die sauren Bestandteile durch Ausziehen mit Alkalien und darauf die basischen durch Behandeln mit Säuren. So gewinnt man z. B. aus dem sogenannten Leichtöl das Phenol und die Pyridinbasen, welch letztere zum Denaturieren von Spiritus Verwendung finden. Aus dem übrig bleibenden Gemenge indifferenter Bestandteile trennt man nach weiterer Reinigung mit konzentrierter Schwefelsäure die einzelnen Kohlenwasserstoffe durch fraktionierte Destillation ab; aus dem Leichtöl Benzol und seine Homologen, aus dem Schweröl Naphtalin und aus dem Anthracenöl Anthracen und Phenanthren (vgl. den Artikel „Teer").

5. Benzolkohlenwasserstoffe. Aus dem Steinkohlenteer sind von den Benzolkohlenwasserstoffen nur Benzol und Toluol durch fraktionierte Destillation leicht rein darzustellen; zur Gewinnung der anderen Homologen bedient man sich im Laboratorium zweckmäßig synthetischer Methoden, von denen die wichtigsten in folgendem angeführt seien: 1. Durch Einwirkung von Natrium auf ein Gemisch von Brom- oder Jodbenzol mit einem aliphatischen Alkylhalogenid erhält man einen homologen Kohlenwasserstoff nach der Gleichung

$$C_6H_5Br + C_2H_5Br + 2Na = C_6H_5C_2H_5 + 2NaBr.$$

Diese sehr allgemeiner Anwendung fähige „Fittigsche Reaktion" entspricht der berühmten Wurtzschen Synthese in der Fettreihe. 2. Setzt man einem Gemenge von Benzol und Alkylchlorid Aluminiumchlorid zu, so wird in heftiger Reaktion Salzsäure abgespalten

$$C_6H_6 + ClCH_3 = C_6H_5CH_3 + HCl$$

(Synthese von Friedel und Crafts). Es können so auch mehrere Wasserstoffatome im Benzolkern substituiert werden. Der Mechanismus der Reaktion ist noch nicht völlig aufgeklärt, jedenfalls bilden sich intermediär additionelle Verbindungen des Aluminiumchlorids mit Benzol. 3. Benzolkohlenwasserstoffe werden durch Destillation ihrer Carbonsäuren mit Natronkalk gebildet

$$C_6H_5COONa + NaOH = C_6H_6 + CO_3Na_2$$

Benzol und seine Homologen sind meist farblose Flüssigkeiten (nur die hochmolekularen sind fest) von charakteristischem Geruch; sie sind in Wasser unlöslich, mit Alkohol und Aether mischbar und besitzen im allgemeinen ein großes Lösungsvermögen für organische Substanzen. Sie sind unzersetzt destillierbar und verbrennen mit leuchtender stark rußender Flamme. In ihrem chemischen Verhalten zeigen sie typisch „aromatischen Charakter" (siehe den Artikel „Aromatische Reihe").

Benzol C_6H_6. Leicht bewegliche, wasserhelle Flüssigkeit vom Siedepunkt 80⁰; Schmelzpunkt + 6⁰. Das aus Teer gewonnene Handelsprodukt enthält stets eine geringe Beimengung von Thiophen C_4H_4S, von welchem es durch Schütteln mit Schwefelsäure befreit werden kann. Das in den einfachen Benzolabkömmlingen sich findende Radikal C_6H_5 wird als „Phenyl" bezeichnet.

Toluol $C_6H_5CH_3$ Siedepunkt 110⁰. Entsteht auch bei der trocknen Destillation des Tolubalsams.

Die drei isomeren Xylole (Dimethylbenzole) $C_6H_4(CH_3)_2$ werden aus dem Teer nur als Gemenge gewonnen, das durch fraktionierte Destillation nicht in seine Bestandteile zerlegt werden kann. o-Xylol wird nach der Fittigschen Synthese aus o-Bromtoluol, Methyljodid und Natrium dargestellt. Siedepunkt 142⁰. m-Xylol läßt sich aus dem aus Teer gewonnenen Rohxylol durch Behandlung mit verdünnter Salpetersäure erhalten, da es bedeutend schwerer oxydiert wird als die beiden anderen Isomeren. Siedepunkt 137⁰. p-Xylol. Reindarstellung aus p-Dibrombenzol und Methyljodid mittels Natrium. Siedepunkt 137⁰.

Von weiteren Homologen des Benzols seien noch erwähnt das Mesitylen (1·3·5-Trimethylbenzol) $C_6H_3(CH_3)_3$, Siedepunkt 163⁰, dessen synthetische Darstellung aus Aceton und Schwefelsäure bereits oben angeführt wurde, und das p-Cymol (p-Methylisopropylbenzol) $C_6H_4(CH_3)(C_3H_7)$, Siedepunkt 153⁰, das sich in der Natur (als Bestandteil ätherischer Oele) häufig findet und wegen seiner Beziehung zu der Gruppe der Terpene von Bedeutung ist.

Außer den eigentlichen Homologen des Benzols gibt es auch noch wasserstoffärmere Kohlenwasserstoffe, die eine ungesättigte Seitenkette enthalten. Zu ihnen gehört das Styrol (Phenyläthylen), $C_6H_5\,CH{=}CH_2$, das sich auch im Steinkohlenteer findet; Siedepunkt 146⁰. In der Natur kommt es im Storax (Styrax officinalis) und im Rindensaft von Liquidambar orientale

vor; im Laboratorium wird es zweckmäßig durch langsame Destillation der Zimmtsäure dargestellt:

$$C_6H_5CH{=}CH\,COOH = C_6H_5CH{=}CH_2 + CO_2.$$

6. Halogensubstitutionsprodukte. Die Halogensubstitutionsprodukte der Benzolkohlenwasserstoffe zerfallen in zwei scharf unterschiedene Gruppen; die eine enthält das Halogen im Benzolkern selbst, wo es sehr fest haftet, und z. B. gegen die Hydroxyl- und Aminogruppe nicht ausgetauscht werden kann; die andere ist in der Seitenkette substituiert und besitzt die gleiche Reaktionsfähigkeit wie die rein aliphatischen Halogenalkyle. Beide Arten von Halogenderivaten entstehen durch direkte Substitution. An welcher Stelle das Halogen eintritt, hängt von den Arbeitsbedingungen ab: in der Kälte, bei Gegenwart von Jod und Ausschluß des direkten Sonnenlichts wandert das Halogen in den Kern, bei erhöhter Temperatur, im Sonnenlicht und bei Gegenwart gewisser Ueberträger, z. B. roten Phosphors, in die Seitenkette. Die Halogensubstitutionsprodukte der Benzolkohlenwasserstoffe sind teils farblose Flüssigkeiten, teils feste kristallisierte Substanzen. Die im Kern substituierten Kohlenwasserstoffe besitzen meist einen angenehmen Geruch, während diejenigen, die das Halogen in der Seitenkette enthalten, scharf und stechend riechen und stark zu Tränen reizen.

Monochlorbenzol C_6H_5Cl, Siedepunkt 132 °, Monobrombenzol C_6H_5Br, Siedepunkt 156 °, Monojodbenzol C_6H_5J, Siedepunkt 185 °.

Benzylchlorid $C_6H_5CH_2Cl$, Siedepunkt 179 °, Benzalchlorid $C_6H_5CHCl_2$, Siedepunkt 206 ° und Benzotrichlorid $C_6H_5Cl_3$, Siedepunkt 213 ° können sämtlich durch Chlorierung von Toluol im direkten Sonnenlicht erhalten werden. Beim Ueberhitzen mit Wasser liefern sie die entsprechenden Sauerstoffverbindungen, nämlich den Benzylalkohol, den Benzaldehyd und die Benzoesäure, z. B.

$$C_6H_5CHCl_2 + H_2O = C_6H_5CHO + 2HCl.$$

7. Nitrokörper. Läßt man auf aromatische Kohlenwasserstoffe konzentrierte Salpetersäure oder Salpeterschwefelsäure einwirken, so erhält man durch Ersatz eines oder mehrerer Kernwasserstoffatome durch die NO_2-Gruppe die sogenannten Nitrokörper (siehe diese)

$$C_6H_6 + HONO_2 = C_6H_5NO_2 + H_2O.$$

Sie sind sowohl für die Wissenschaft wie für die Technik von großer Wichtigkeit, da man von ihnen aus, meist auf dem Wege über Amino- und Diazokörper, zu den verschiedensten Derivaten gelangen kann.

Die aromatischen Nitrokörper sind gelbliche Flüssigkeiten oder kaum gelb gefärbte kristallisierte Substanzen, zum Teil unzersetzt destillierbar und mit Wasserdämpfen flüchtig, in Wasser wenig, in organischen Lösungsmitteln meist leicht löslich. Als charakteristischer Vertreter sei hier nur das Nitrobenzol $C_6H_5NO_2$ angeführt, das besonders als Ausgangsmaterial für die Darstellung von Anilin von Bedeutung ist. Gelbliches Oel vom Siedepunkt 209°. Wegen seines dem des Bittermandelöls ähnlichen Geruchs findet es in der Parfümindustrie als Ersatzmittel für Bittermandelöl Verwendung (Mirbanöl).

Besonderes Interesse verdient das Verhalten der Nitrokörper gegen reduzierende Agentien. Je nachdem, welches Reduktionsmittel man anwendet, gelangt man zu verschiedenen Gruppen von Verbindungen; bei Reduktion in saurer Lösung erhält man die Amine, in alkalischer Lösung die Azoxy-, Azo- und Hydrazokörper und in neutraler Lösung die Hydroxylamine. Von diesen Reduktionsprodukten handeln die drei folgenden Abschnitte.

8. Amine nebst Diazokörpern und Hydrazinen (siehe den Artikel „Ammoniakderivate"). Der wichtigste Vertreter dieser Gruppe ist das Anilin $C_6H_5NH_2$. Man erhält es in der Technik durch Reduktion des Nitrobenzols mit Eisenspänen und Salzsäure

$$C_6H_5NO_2 + 3Fe + 6HCl = C_6H_5NH_2 + 3FeCl_2 + 2H_2O.$$

Man braucht aber eine viel geringere Menge Salzsäure als der Gleichung entspricht, da bei einmal eingeleiteter Reaktion das Nitrobenzol schon durch fein verteiltes Eisen und Wasser reduziert wird.

$$C_6H_5NO_2 + 2\,Fe + 4\,H_2O = C_6H_5NH_2 + 2\,Fe(OH)_3.$$

Im Laboratorium verwendet man zur Darstellung des Anilins aus Nitrobenzol zweckmäßig Zinn und Salzsäure; auch Schwefelammonium ist brauchbar.

Das Anilin ist eine in ganz reinem Zustande farblose, sich leicht dunkel färbende Flüssigkeit von starkem Lichtbrechungsvermögen und charakteristischem, unangenehm basischen Geruch. Sein Siedepunkt liegt bei 184 °, es ist in Wasser wenig löslich und mit Wasserdämpfen flüchtig. In Säuren löst es sich unter Bildung von Salzen, z. B. $C_6H_5NH_2.HCl$, leicht auf. Durch die negative Natur der Phenylgruppe ist aber die Basizität des Anilins gegenüber den aliphatischen Aminen so stark herabgesetzt, daß es gegen Lakmus und Phenolphtalein nicht mehr basisch reagiert, und auch kein kohlensaures Salz mehr zu bilden vermag. Mit Oxydationsmitteln liefert das Anilin je nach den Bedingungen verschiedene Produkte, von denen Chinon und Anilinschwarz die wichtigsten sind; gegen Reduktionsmittel ist es äußerst beständig.

Vom Anilin gelangt man durch Ersatz der am Stickstoff befindlichen Wasserstoffatome durch aliphatische oder aromatische Kohlenwasserstoffreste zu sekundären und tertiären Basen. Bei Behandlung des Anilins mit Halogenalkylen erhält man fettaromatische, sogenannte gemischte Basen,

die wie das Anilin schwachbasischen Charakter besitzen und mit Säuren beständige Salze liefern. Die rein aromatischen Basen, Di- und Triphenylamin, $(C_6H_5)_2NH$ und $(C_6H_5)_3N$, haben dagegen die Basizität ganz oder fast ganz verloren; das Triphenylamin bildet überhaupt keine Salze mehr und das Diphenylamin nur solche mit starken Säuren, die aber schon mit Wasser zersetzt werden.

Die tertiären Basen vom Typus des Dimethylanilins sind imstande, sich mit noch einer Molekel Halogenalkyl zu quaternären Salzen zusammenzulagern

$$C_6H_5N(CH_3)_2 + CH_3J = C_6H_5N(CH_3)_3J.$$

Die diesen Salzen zugrunde liegenden Trialkylaniliniumhydroxyde sind wie die analogen quaternären Basen der Fettreihe sehr starke, den Alkalihydroxyden vergleichbare Basen.

Von besonderer Wichtigkeit ist das Verhalten der verschiedenen Amine gegen salpetrige Säure. Die sekundären und tertiären reagieren damit unter Bildung von Nitrosoverbindungen und zwar bilden die sekundären dabei Nitrosamine, in denen das letzte am Stickstoff noch vorhandene Wasserstoffatom durch die Nitrosogruppe ersetzt wird:

$$C_6H_5NHCH_3 + HONO = C_6H_5N(NO)CH_3 + H_2O.$$

Bei den tertiären Basen tritt dagegen die Nitrosogruppe in den Kern ein, und zwar in p-Stellung

$$C_6H_5N(CH_3)_2 + HONO = NO.C_6H_4N(CH_3)_2 + H_2O.$$

Die Nitrosamine besitzen keine basischen Eigenschaften mehr, wogegen die im Kern nitrosierten Amine noch säurelöslich sind; auf diesem verschiedenen Verhalten der Reaktionsprodukte mit salpetriger Säure beruht ein sehr wichtiges Trennungsverfahren der sekundären von den tertiären und, wie aus dem Folgenden hervorgeht, auch von den primären Aminen.

Am interessantesten und wichtigsten sind die Veränderungen, die die primären aromatischen Amine mit salpetriger Säure erfahren. Während die aliphatischen primären Amine durch salpetrige Säure unter Stickstoffentwickelung direkt in die zugehörigen Alkohole übergeführt werden, kommt es bei den aromatischen Aminen bei geeigneter Wahl der Arbeitsbedingungen zur Bildung eines Zwischenprodukts, einer sogenannten Diazoniumverbindung. Die sich dabei abspielende Reaktion wird durch folgende Gleichung wiedergegeben

$$C_6H_5NH_2 . HNO_3 + NO_2H = C_6H_5N.NO_3 + 2H_2O$$
$$\qquad\qquad\qquad\qquad N$$

Benzoldiazoniumnitrat.

Die salpetrige Säure wird entweder gasförmig in die wässerige Anilinsalzlösung eingeleitet, oder sie kommt — und das ist die weitaus am häufigsten angewandte Methode — in statu nascendi zur Verwendung, indem man zu der angesäuerten Lösung eines Anilinsalzes eine Natriumnitritlösung zutropfen läßt. Die Diazoniumsalze reagieren neutral, sodaß also der ihnen zugrunde liegenden (hypothetischen) Hydroxylverbindung $C_6H_5.N.OH$ der Charakter einer starken Base

N

zukommen muß. Dieses Diazoniumhydroxyd hat indessen wegen seiner außerordentlichen Unbeständigkeit bisher nicht isoliert werden können. In wässerigem Alkali lösen die Diazoniumsalze sich leicht auf unter Bildung von Alkalisalzen, sogenannten Diazotaten. Die Diazotate enthalten keinen 5-wertigen Stickstoff mehr, sondern besitzen die durch die Formel $C_6H_5N{=}NOK$ wiedergegebene Konstitution; beim Erhitzen mit konzentriertem Alkali gehen sie in Isodiazotate über, welche mit den Diazotaten stereoisomer sind

$C_6H_5.N$ ‖ (syn-Form) $KO.N$	$C_6H_5.N$ ‖ (anti-Form) $N.OK$
Kaliumdiazotat	Kaliumisodiazotat

Die von Peter Grieß (1860) entdeckten Diazoverbindungen spielen wegen ihrer großen Reaktionsfähigkeit in der Chemie der aromatischen Reihe eine außerordentlich bedeutende Rolle. In trockenem Zustande stellen sie sehr gefährliche Substanzen dar, da sie durch Stoß oder Erhitzen mit ungeheurer Heftigkeit explodieren. Man benutzt daher gleich ihre bei der Behandlung der aromatischen Amine mit salpetriger Säure (bei der „Diazotierung“) entstehenden Lösungen zur Weiterverarbeitung nach folgenden Reaktionen

1. Beim Erhitzen mit Wasser liefern sie unter Stickstoffabspaltung Phenole:

$$C_6H_5N_2SO_4H + H_2O = C_6H_5OH + N_2 + H_2SO_4.$$

2. Durch Alkohol (unter Oxydation des Alkohols zu Aldehyd) oder durch Zinnchlorür in alkalischer Lösung werden sie zu Kohlenwasserstoffen reduziert $C_6H_5N_2Cl + H_2 = C_6H_6 + HCl + N_2$.

3. Erwärmt man ein Diazoniumsalz mit Cuprohalogenid oder -cyanid, so tritt das Halogenatom oder der Cyanrest an Stelle des Diazokomplexes (Sandmeyersche Reaktion)

$$C_6H_5N_2Cl = C_6H_5Cl + N_2 \text{ und: }$$
$$C_6H_5N_2CN = C_6H_5CN + N_2.$$

Die Cuprosalze wirken dabei rein katalytisch.

Diese Reaktionen gestatten es also, in einem aromatischen Amin auf dem Wege über das Diazoniumsalz die Aminogruppe durch Hydroxyl, Wasserstoff, Halogen oder die Cyangruppe auszutauschen, wobei stets eine Eliminierung der Diazogruppe stattfindet. Bei den folgenden Umsetzungen bleibt dagegen der Stickstoffkomplex erhalten:

4. Benzoldiazoniumchlorid tritt in neutraler oder essigsaurer Lösung mit primären und sekundären Aminen zu sogenannten Diazoaminoverbindungen zusammen

$$C_6H_5N_2Cl + NH_2C_6H_5 = C_6H_5N{=}N{-}NHC_6H_5 + HCl.$$
Diazoaminobenzol

Die Diazoaminoverbindungen lagern sich bei Gegenwart von salzsauren Aminen leicht in die isomeren Aminoazokörper um, bei denen der Aminstickstoff in p-Stellung zur Azogruppe steht

$$C_6H_5N{=}N{-}NHC_6H_5 \longrightarrow C_6H_5N{=}N.C_6H_4.NH_2.$$

Diese Aminoazokörper, die wertvolle Farbstoffe darstellen, erhält man direkt durch Vereinigung („Kuppelung") von Benzoldiazoniumchlorid mit tertiären Aminen

$$C_6H_5N_2Cl + C_6H_5N(CH_3)_2 = C_6H_5N{=}NC_6H_4N(CH_3)_2 + HCl.$$

In entsprechender Weise „kuppeln" die Diazoniumverbindungen in alkalischer Lösung mit Phenolen unter Bildung von Oxyazoverbindungen

$$C_6H_5N_2Cl + C_6H_5OK = C_6H_5N{=}NC_6H_4.OH + KCl$$

Die Hydroxylgruppe tritt dabei ebenfalls in p-Stellung zur Azogruppe. Die Oxyazokörper sind wie die Aminoazoverbindungen äußerst wichtige Farbstoffe; diese Kuppelungsreaktionen sind daher von enormer technischer Bedeutung.

In naher Beziehung zu den Diazokörpern stehen die Hydrazine, Verbindungen, die sich vom Diamid, $H_2N.NH_2$, durch Ersatz von Wasserstoff durch einen Kohlenwasserstoffrest ableiten. Die primären Hydrazine, deren wichtigster Vertreter das Phenylhydrazin, $C_6H_5NHNH_2$ ist, erhält man durch Reduktion von Benzoldiazoniumchlorid mit Natriumsulfit oder Zinnchlorür und Salzsäure

$$C_6H_5N_2Cl + 4H = C_6H_5NHNH_2.HCl.$$

Das Phenylhydrazin, eine farblose, leicht veränderliche Flüssigkeit von ziemlich giftigen Eigenschaften, ist als Reagenz auf Aldehyde und Ketone von großer Bedeutung, es bildet mit ihnen unter Wasseraustritt die Hydrazone

$$C_6H_5CHO + NH_2NHC_6H_5 = C_6H_5CH{=}N.NHC_6H_5 + H_2O.$$

Bei der Einwirkung von Phenylhydrazin auf gewisse Zuckerarten, z. B. die Hexosen, entstehen zunächst ebenfalls Hydrazone, dann die höchst charakteristischen Osazone (vgl. den Artikel „Kohlehydrate").

9. Azoxy-, Azo- und Hydrazoverbindungen. Wird eine aromatische Nitroverbindung in alkalischer Lösung reduziert, so erhält man im allgemeinen keine Amine, sondern je nach den Reaktionsbedingungen Azoxy-, Azo- oder Hydrazokörper

$$C_6H_5.\overset{O}{N - N}.C_6H_5 \qquad C_6H_5N{:}NC_6H_5$$
Azoxybenzol Azobenzol

$$C_6H_5NH.NHC_6H_5$$
Hydrazobenzol

Die Azoxyverbindungen bekommt man aus den Nitrokörpern durch Reduktion mit kochender alkoholischer Kalilösung. Es sind schwach gefärbte kristallisierende Substanzen, die leicht weiter reduzierbar sind und beim Erwärmen mit konzentrierter Schwefelsäure sich in die isomeren Oxyazokörper umlagern

$$C_6H_5.N_2O.C_6H_5 \longrightarrow C_6H_5.N{=}N.C_6H_4.OH$$

Die Azokörper entstehen aus den Nitro- oder Azoxyverbindungen beim Behandeln mit Natriumamalgam oder mit alkalischer Zinnoxydullösung. Sie sind ausnahmslos durch starke Färbung ausgezeichnet und bilden meist lebhaft rot oder orange gefärbte Kristalle, die in Säuren und Basen unlöslich und als sehr beständige Substanzen unzersetzt destillierbar sind; durch Zinkstaub und Natronlauge werden sie in die Hydrazoverbindungen übergeführt

$$C_6H_5N{:}NC_6H_5 + 2H = C_6H_5NH.NHC_6H_5.$$

Diese sind im Gegensatz zu den Azokörpern farblose Substanzen von neutralem Charakter, die schon durch Luftsauerstoff zu den Azokörpern zurückoxydiert werden. Für die Technik (Farbstoffindustrie) sind sie wegen einer Umlagerung bedeutsam, die sie bei der Einwirkung von Mineralsäuren erleiden („Benzidinumlagerung"). Es findet dabei eine Verschiebung der Atome im folgenden Sinne statt:

$$C_6H_5.NH.NH.C_6H_5 \rightarrow H_2N.C_6H_4.C_6H_4.NH_2.$$
Hydrazobenzol Benzidin

10. Phenylhydroxylamin C_6H_5NHOH entsteht, wie schon erwähnt, bei der Reduktion des Nitrobenzols in neutraler Lösung mit Zinkstaub und Chlorammonium oder auch bei vorsichtiger Reduktion mit Schwefelammonium

$$C_6H_5NO_2 + 4H = C_6H_5NHOH + H_2O.$$

Es kristallisiert in farblosen, sehr unbeständigen Nadeln vom Schmelzpunkt 81°, ist sehr oxydabel, reduziert daher ammoniakalische Silberlösung und wird durch Chromsäure zu Nitrosobenzol, C_6H_5NO, oxydiert. Seine Lösungen sind giftig. Mit Schwefelsäure lagert es sich in das isomere p-Aminophenol um

$$C_6H_5NHOH \longrightarrow HO.C_6H_4.NH_2.$$

11. Sulfosäuren. Benzolkohlenwasserstoffe reagieren ziemlich leicht mit konzentrierter Schwefelsäure unter Bildung von Sulfosäuren

$$C_6H_6 + H_2SO_4 = C_6H_5SO_3H + H_2O.$$

Die Benzolsulfosäure ist eine sehr starke Säure. Fast alle Sulfosäuren sind

ebenso wie ihre Natriumsalze in Wasser leicht löslich. Man bedient sich daher der Sulfurierung, um wasserunlösliche, aromatische Körper in wasserlösliche überzuführen, was besonders in der Farbstoffchemie von Bedeutung ist. Sulfosäuren sind weiterhin wichtig als Zwischenprodukt für die Darstellung der Phenole, da sie beim Schmelzen mit Alkali die Sulfogruppe gegen Hydroxyl austauschen

$$C_6H_5SO_3K + KOH = C_6H_5OH + K_2SO_3.$$

12. Phenole. Die Phenole entsprechen in ihrer Konstitution den aliphatischen Alkoholen; wie diese leiten sie sich von den Kohlenwasserstoffen durch Ersatz eines Wasserstoffatoms gegen Hydroxyl ab. Analog den Alkoholen vermögen die Phenole Aether und Ester zu bilden; infolge der elektronegativen Natur des Phenylrests haben sie aber stärker sauren Charakter als die Alkohole und vereinigen sich mit starken Basen zu wasserbeständigen Salzen, sind also in wässriger Natronlauge löslich. Je nach der Zahl der Hydroxylgruppen unterscheidet man ein- und mehrwertige Phenole; so können im Benzol alle 6 Wasserstoffatome durch die Hydroxylgruppe ersetzt werden. Das einfachste Phenol, C_6H_5OH, findet als Carbolsäure ausgedehnte Verwendung zu antiseptischen Zwecken, ein zweiwertiges Phenol ist z. B. das 1.4-Dioxybenzol oder Hydrochinon, viel gebraucht als photographischer Entwickler; von den dreiwertigen ist das bekannteste das Pyrogallol (1.2.3-Trioxybenzol), dessen alkalische Lösungen in der Gasanalyse als energisches Absorptionsmittel für Sauerstoff dienen.

13. Chinone. Durch Oxydation des Hydrochinons mit Chromsäure entsteht Chinon, $C_6H_4O_2$, stechend riechende, gelbe Kristalle von großer Reaktionsfähigkeit. Meist stellt man es durch Oxydation des Anilins dar; es bildet sich ferner leicht aus vielen p-Derivaten z. B. p-Aminophenol unter der Einwirkung von Oxydationsmitteln. — Dem Chinon erteilt man die eigentümliche Konstitutionsformel

O=⟨=⟩=O

eine ähnliche „chinoide“ Atomanordnung liegt sehr vielen Farbstoffen zugrunde. (Näheres siehe in dem Artikel „Chinone“.)

14. Alkohole, Aldehyde und Ketone. Tritt die Hydroxylgruppe in eine aromatische Verbindung nicht in den Kern, sondern in die Seitenkette ein, so entsteht nicht ein Phenol, sondern ein aromatischer Alkohol (siehe den Artikel „Alkohole“), der in seinem Verhalten den aliphatischen Alkoholen durchaus entspricht. Als ihr einfachster Vertreter sei der Benzylalkohol, $C_6H_5CH_2OH$, erwähnt, der beim Behandeln von Benzaldehyd mit Kali in einer eigentümlichen Reaktion entsteht

$$2C_6H_5CHO + KOH = C_6H_5CH_2OH + C_6H_5COOK.$$

Aus den primären und sekundären aromatischen Alkoholen entstehen durch Oxydation aromatische Aldehyde und Ketone (siehe bei diesen). Der bekannteste aromatische Aldehyd ist der Benzaldehyd, C_6H_5CHO, gewöhnlich unter dem Namen Bittermandelöl bekannt. Ein einfacher Vertreter der aromatischen Ketone ist das Benzophenon, $C_6H_5COC_6H_5$, welches durch Destillation von benzoesaurem Kalk erhalten wird

$$(C_6H_5COO_2)Ca = C_6H_5COC_6H_5 + CaCO_3.$$

Die aromatischen Aldehyde und Ketone sind in ihrem chemischen Verhalten den aliphatischen völlig ähnlich, liefern z. B. mit Natriumbisulfit kristallisierende Additionsprodukte, mit Hydrazinen Hydrazone usw.

15. Säuren. Durch weitere Oxydation der Aldehyde gelangt man zu den aromatischen Säuren. Auch diese lassen sich den aliphatischen Säuren durchaus an die Seite stellen, unterscheiden sich von ihnen nur dadurch, daß sie als Benzolderivate noch verhältnismäßig leicht nitrierbar, sulfurierbar usw. sind; auch sind sie stärkere Säuren als die Fettsäuren. Außer durch Oxydation der zugehörigen Alkohole oder Aldehyde bilden sie sich auch durch Oxydation der homologen Benzolkohlenwasserstoffe und aller Benzolderivate, die eine Kohlenstoffseitenkette enthalten; so entsteht aus Toluol Benzoesäure, aus Chlortoluol $C_6H_4Cl.CH_3$ Chlorbenzoesäure, aus den Xylolen die Phtalsäuren $C_6H_4(COOH)_2$.

Die einfachste aromatische Säure ist die Benzoesäure C_6H_5COOH, welche sich vielfach in der Natur (im Benzoeharz, im Perubalsam) findet. Sie kristallisiert in weißen Blättchen oder Nadeln vom Schmelzpunkt 121° und ist wie die meisten aromatischen Säuren in kaltem Wasser schwer löslich. Die Dicarbonsäuren des Benzols werden als Phtalsäuren bezeichnet: die wichtigste davon ist die o- oder gewöhnliche Phtalsäure. Sie kristallisiert in Blättchen vom Schmelzpunkt 213°. Technisch wird sie durch Oxydation des Naphtalins mit Quecksilber und konzentrierter Schwefelsäure gewonnen. Sie ist ein Zwischenprodukt der künstlichen Darstellung des Indigos.

16. Verschiedenes. Der Uebersichtlichkeit halber sind oben von jeder Gruppe nur die einfachsten Vertreter behandelt worden, d. h. solche, die nur eine charakteristische Gruppe, Amino-, Sulfogruppe usw. enthalten. Die unendliche Mannigfaltigkeit der aromatischen Verbindungen kommt aber dadurch zustande, daß in ein

und derselben Substanz verschiedene Gruppen gleichzeitig vorhanden sein können, wie im Aminophenol, im Chlornitrobenzol, einer Oxysäure usw. Das Eingehen auf alle diese Verbindungen würde zu weit führen; nur einige seien erwähnt, die ihrer besonderen Wichtigkeit wegen allgemeineres Interesse beanspruchen. Von allen diesen Körpern gilt, daß sie die Reaktionen der verschiedenen Klassen, zu denen sie gehören, aufweisen; so zeigt ein Aminophenol zugleich die Reaktionen eines Amins und eines Phenols, eine Nitrocarbonsäure das Verhalten eines Nitrokörpers und einer Säure usw.

Sulfanilsäure (p-Aminobenzolsulfosäure), $C_6H_4(NH_2)SO_3H$, kristallisiert in rhombischen Tafeln, die in kaltem Wasser sehr schwer löslich sind. Wichtig für die Gewinnung von Azofarbstoffen.

Pikrinsäure (2.4.6-Trinitrophenol), $C_6H_2(NO_2)_3OH$, kristallisiert in Wasser schwer löslichen gelben Blättchen vom Schmelzpunkt 122°. Wird technisch durch Nitrieren der Phenolsulfosäure dargestellt und findet in der Farb- und Sprengstoffindustrie Verwendung.

Saccharin, $C_6H_4\left<\begin{matrix}CO\\SO_2\end{matrix}\right>NH$, der bekannte Ersatzstoff für Zucker, ist das Imid der o-Sulfobenzoesäure, $C_6H_4(SO_3H).COOH$.

Salicylsäure (o-Oxybenzoesäure), $C_6H_4(OH).COOH$, farblose Prismen vom Schmelzpunkt 159°. Kommt in der Natur in der Senegawurzel (als freie Säure) und im Wintergrünöl (als Methylester) vor. Anwendung in der Medizin als Antisepticum und als Heilmittel gegen Rheumatismus (besonders als Natriumsalz).

Literatur. ***V. Meyer und P. Jacobson,*** *Lehrbuch der organischen Chemie II. Bd. 1. Teil Leipzig 1902.*

Jakob Meisenheimer

Bergman

Torbern (Olof).

Geboren am 20. März 1735 zu Katharinberg (Westgotland in Schweden); gestorben am 8. Juli 1784 zu Bad Medewi (am Wettersee in Ostgotland). Sein Vater Barthold stammte aus der Gegend des Harzes und war königlicher Steuereinnehmer. Den ersten Unterricht erhielt Bergman auf dem Gymnasium zu Skara; mit 17 Jahren bezog er die Universität Upsala, um Naturwissenschaft und Mathematik zu studieren. Er schloß sich als Schüler Linné an und erregte durch einige vorzügliche zoologische Untersuchungen dessen Aufmerksamkeit. 1758 ward er Magister und Professor der Physik, mußte aber, bis ihm 1761 die Stelle eines Adjunkten der Mathematik übertragen wurde, sich den Lebensunterhalt durch Privatunterricht verdienen. Nach dem Rücktritt von Wallerius bewarb er sich um die Professur für Chemie, obwohl er auf diesem Gebiete noch nichts veröffentlicht hatte. Eine in wenig Tagen vollendete mustergültige Abhandlung über die Alaunfabrikation bewies seine hohe Begabung für Chemie, der er sich, nachdem ihm 1767 die Professur übertragen worden war, von da an ausschließlich widmete. Seit 1764 war er Mitglied der Stockholmer Akademie, die ihm 1777 die Präsidentenstelle übertrug und ihm ein Jahresgehalt von 150 Rixdaler zu den Kosten seiner Versuche bewilligte. Eine Berufung als ord. Mitglied der königlichen Akademie der Wissenschaften zu Berlin durch Friedrich den Großen lehnte er 1776 ab. Seit 1769 durch mühsame und schädliche Laboratoriumsarbeiten angegriffen, erlag seine von Jugend an wechselnde Gesundheit den Folgen eines Fehlsturzes ins Wasser während des Gebrauchs der Bäder zu Medewi.

Ihm verdankt die Chemie die genaue Kenntnis der Kohlensäure und Oxalsäure, deren künstliche Darstellung er lehrte, die Entdeckung des Schwefelwasserstoffs, die Einführung mathematischer Genauigkeit und bahnbrechende Untersuchungen für die Affinitätslehre. Die Mineralogie verdankt ihm außer zahlreichen Mineralanalysen, wozu er Methoden auf nassem und trockenem Wege lieferte, die Kenntnis von geometrischen Beziehungen zwischen den einzelnen Kristallformen, die erste Grundlage der Kristallographie. Seine wesentlichen Schriften (ausführliches Verzeichnis bei Poggendorff 1, 150) sind: 1766 Physikalische Erdbeschreibung; 1778 Chemische Verwandtschaftslehre; 1782 Sciagraphie des Mineralreiches. Fast alle seine Arbeiten sind in 3 Bänden, der 4. ist unvollendet, der 1779 bis 1783 erschienenen Opuscula physica et chimica enthalten.

Literatur. ***Hoefer,*** *Histoire de la Chimie II, 439 bis 457.* — ***Ersch und Gruber,*** *Allg. Enz. d. Wiss. u. K. 9, 125 bis 127.* — *Nouvelle Biogr. univers.* ***(Hoefer)*** *5, 520.*

K. Spangenberg.

Bernard

Claude.

1813 bis 1873. Er wurde in St. Julien bei Villefranche unweit von Lyon geboren, widmete sich anfangs der schriftstellerischen Laufbahn, ging erst in vorgeschrittenem Alter zur Medizin über, wurde 1841 Präparator im Laboratorium von Magendie, erhielt 1853 die eigens für ihn begründete Professur der allgemeinen Physiologie in Paris und wurde 1855 als Nachfolger von Magendie Ordinarius der Physiologie am Collège de France, wo er bis zu seinem Lebensende tätig war. Bernard war einer der glänzendsten physiologischen Forscher der Neuzeit, ein vorzüglicher Experimentator und Vivisektor, dem die Physiologie zahlreiche Entdeckungen verdankt. Seine bekanntesten Experimentalarbeiten betreffen (nach Haesers Zusammenstellung) die Rolle des Pankreas bei der Verdauung der Fette (1846), die experimentelle Erzeugung des Diabetes (1849), die vasomotorische Bedeutung des Sympathicus (1851), die Zuckerbildung in der Leber (1853), den Einfluß der Chorda tympani auf den Blutstrom in der Unterkieferdrüse und die hieraus hervorgegangene Entdeckung der gefäßerweiternden Nerven (1858) und zahlreiche toxikologische und pharmakodynamische Forschungen. Sein epoche-

machendes Hauptwerk waren die Leçons sur les phénomènes de la vie communs aux animaux et aux végétaux, die erst nach seinem Tode vollständig erschienen.

Literatur. *Biogr. Lex.*

J. Pagel.

Bernhardi

Johann Jacob.

Botaniker. Geboren am 1. September 1774 in Erfurt, wirkte als ordentlicher Professor in der medizinischen Fakultät der dortigen Universität, bis zu deren Aufhebung im Jahre 1816, behielt aber die Direktion des botanischen Gartens, um den er sich besondere Verdienste erwarb. Er starb in Erfurt am 13. Mai 1850. Unter seinen Schriften sind besonders die Beobachtungen über Pflanzengefäße und eine neue Art derselben (Erfurt 1804) zu nennen, die eine Einteilung der Gewebearten und der Gefäße sowie Untersuchungen über ihren Bau enthalten, welche als die besten seit Malpighi bezeichnet werden können. Unter seinen übrigen Veröffentlichungen seien noch die über die Flora von Erfurt (Erfurt 1800) und ein Handbuch der Botanik Bd. 1 (Erfurt 1804) genannt. Von 1815 bis 1824 gab er die Thüringische Gartenzeitung und das Allgemeine deutsche Gartenmagazin heraus.

W. Ruhland.

Bernoulli

Daniel.

Geboren am 29. Januar 1700 in Groningen; gestorben am 17. März 1782 zu Basel. Er war der Sohn von Johann Bernoulli, studierte Mathematik und Medizin, 1724 erhielt er einen Ruf als Präsident an die neugegründete Akademie zu Genua, den er ausschlug, ging aber 1725 mit seinem Bruder Nikolaus an die neugegründete Petersburger Akademie; Nikolaus starb dort im folgenden Jahre und Daniel kehrte 1733 nach Basel zurück, wo er 1750 zum Professor der Physik und Philosophie ernannt wurde. Er war Mitglied der Akademie zu Paris, Berlin, Petersburg und der Royal Society. Als Erster behandelte er die Bewegung der flüssigen Körper durch mathematische Analyse, gab eine Theorie der Saitenschwingung auf trigonometrischem Wege. Die Mathematik verdankt ihm eine Erweiterung der Wahrscheinlichkeitsrechnung.

Literatur. *Die Basler Mathematiker Daniel Bernoulli und Leonhard Euler, Festschr., Basel 1884.* — ***Rosenberger.*** *Gesch. d. Phys. II, S. 288, Braunschweig 1884.*

E. Drude.

Bernoulli

Jakob.

Geboren am 27. Dezember 1654 in Basel; gestorben ebenda am 16. August 1705. Für den geistlichen Stand bestimmt, trieb Bernoulli heimlich Mathematik; nach Absolvierung der theologischen Prüfung 1676 reiste er nach Holland, England und Frankreich und wandte sich nunmehr völlig der Mathematik zu. 1687 wurde Bernoulli Professor der Mathematik in Basel, 1699 Mitglied der Pariser, 1701 der Berliner Akademie der Wissenschaften. Er baute die Differential- und Integralrechnung aus (von ihm stammt die Bezeichnung Integral) und löste mit deren Hilfe eine Reihe der schwierigsten mathematisch-physikalischen Probleme.

Literatur. ***Rosenberger.*** *Gesch. d. Phys. II, S. 273, Braunschweig 1884.*

E. Drude.

Bernoulli

Johann.

Geboren am 27. Juni 1667 in Basel; gestorben am 1. Januar 1748 daselbst. Er war ein Bruder von Jakob Bernoulli, studierte Medizin und Mathematik, wurde 1695 Professor in Groningen, 1705 Nachfolger Jakob Bernoullis in Basel, 1699 Mitglied der Pariser Akademie, desgleichen in den folgenden Jahren der Akademien zu Berlin und Petersburg. Bernoulli war ein eifriger Verfechter Leibniz' in dessen Streit mit Newton über die Erfindung der Differentialrechnung. Der Schwerpunkt seiner Tätigkeit liegt auf dem Gebiet der Mathematik, vorzüglich der Integralrechnung; seine physikalischen Arbeiten beschränken sich fast ganz auf die Mechanik und auf einen Versuch, das Brechungsgesetz des Lichts aus mechanischen Gründen abzuleiten.

Literatur. ***Rosenberger.*** *Gesch. d. Phys. S. 275, Braunschweig 1884.*

E. Drude.

Berthelot

Marcellin.

Geboren am 27. Oktober 1827 in Paris, gestorben daselbst am 18. März 1907, hat lange Zeit eine führende Rolle unter den französischen Chemikern gespielt. Er war einige Jahre Unterrichtsminister, sonst Professor am Collège de France und lange Zeit ständiger Sekretär der französischen Akademie. Ueber sein Leben und Wirken gibt der von C. Graebe geschriebene ausführliche Nekrolog (Ber. 41, 4805) besten Aufschluß. Berthelots tiefgründige Arbeiten im Bereiche der Geschichte der Chemie, besonders über ihre Entwickelung in alter Zeit, über die Alchemie und ihren Zusammenhang mit den Neuplatonikern, sind als Quellenstudien in hohem Ansehen. Seine Experimentalarbeiten gehören verschiedenen Gebieten der Chemie an: in erster Linie der organischen, die er besonders

durch seine wichtigen Forschungen über Ester und deren Verhalten, sowie über Synthese (vgl. sein zweibändiges Werk Chimie organique fondée sur la synthese 1860) bereicherte; sodann der physikalischen. Der Thermochemie widmete er die besten Kräfte (vgl. Mécanique chimique fondée sur la thermochimie 1879 und Thermochimie 4 Bde., 1897).

E. von Meyer.

Berthollet

Claude Louis.

Geboren am 9. November 1748 in Talloire, Savoyen, gestorben zu Arceuil bei Paris am 6. November 1822, war als Forscher und Lehrer berühmt und besonders bei der Organisation des französischen Unterrichtswesens tätig. Große Bedeutung erlangten seine Untersuchungen über die chemische Affinität, die in dem zweibändigen Essai de statique chimique (1803) zusammengefaßt wurden. Erst spät, etwa seit 1867, kamen seine Grundgedanken wieder zur Geltung. Berthollets Experimentalarbeiten über Ammoniak, Blausäure, Hypochlorite und Chlorate sind als besonders wichtig zu nennen.

E. von Meyer.

Berylliumgruppe.

a) Beryllium. b) Magnesium. c) Calcium. d) Strontium. e) Barium. f) Zink. g) Cadmium. h) Quecksilber. i) Radium.

a) Beryllium.

Be. Atomgewicht 9,1.

1. Geschichte und Vorkommen. 2. Wertigkeit und Stellung im periodischem System. 3. Darstellung. 4. Elektrochemie und analytische Chemie. 5. Spezielle Chemie. 6. Photochemie.

In der französischen und englischen Nomenklatur heißt dieses Element Glucinium oder Glycium mit dem Zeichen Gl.

1. Geschichte und Vorkommen. Das Oxyd des Berylliums, die Beryllerde wurde 1798 von Vauquelin im Beryll aufgefunden und näher charakterisiert, das Element selbst wurde 1828 von Wöhler dargestellt.

Das Beryllium findet sich in verschiedenen Mineralien, die jedoch alle eine verhältnismäßig geringe Verbreitung haben, so daß das Beryllium zu den selteneren Elementen gehört. Das häufigste Berylliummineral ist der Beryll $Be_3Al_2Si_6O_{18}$ (Smaragd, Aquamarin) mit 14% BeO. Seltener kommen vor Phenakit Be_2SiO_4 (45% BeO). Chrysoberyll (Alexandrit) $BeAl_2O_4$ (19,7% BeO); Euklas $H_2Be_2Al_2Si_2O_{10}$ (17% Be); Gadolinit $FeBe_2Y_2Si_2O_{10}$ (10,7% BeO).

2. Wertigkeit und Stellung im periodischen System. Die Wertigkeit des Berylliums ist lange strittig gewesen. Wegen der vielen analytischen Analogien zwischen Beryllerde und Tonerde war man lange Zeit geneigt, das Beryllium den dreiwertigen Elementen zuzurechnen, um so mehr als der Wert der spezifischen Wärme bei gewöhnlicher Temperatur sowie manche Isomorphiebeziehungen dieser Folgerung nicht widersprechen. Durch die Dampfdichte-Bestimmung des Beryllium-Chlorids und Bromids, sowie des Berylliumacetylacetonats $Be(C_5H_7O_2)_2$ ist indessen die Zweiwertigkeit dieses Elementes vollständig sicher gestellt. Zum gleichen Schluß führen auch die kryoskopischen und ebullioskopischen Methoden, nach welchen Bestimmungen mit Lösungen des wasserfreien Chlorids in Pyridin und des Pikrats $Be(C_6H_3N_3O_7)_2$ in Acetophenon ausgeführt worden sind.

Bei Annahme der Zweiwertigkeit des Berylliums ergibt sich sein Atomgewicht nach Nilson und Pettersson auf Grund der Beziehung. $BeSO_4.4H_2O$:BeO mit 9,11 und nach Parsons aus den Beziehungen $Be(C_5H_7O_2)_2$: BeO und $Be_4O(C_2H_3O_2)_6$: 4BeO mit 9,10. Die letztere Zahl ist die genauere und heute allgemein angenommen.

Nach Wertigkeit und Atomgewicht ist das Beryllium im periodischen System der Elemente das typische Element der zweiten Gruppe. Als solches zeigt es in seinen Eigenschaften manche Abweichungen gegenüber den anderen Elementen dieser Gruppe. Besonders auffällig wird dieser Unterschied im Verhalten der wässerigen Lösungen seiner Salze. Dagegen besitzt das Beryllium vielfache Analogien mit dem Aluminium. Im metallischen Zustand verhalten sich beide Elemente sehr ähnlich; ihre Oxyde sind sehr schwache Basen im Gegensatz zu dem ausgesprochen basischen Charakter von BaO, SrO, CaO, MgO; ihre Salze erleiden deshalb auch in wässeriger Lösung starke Hydrolyse, welche Eigenschaft den Salzen der eben genannten Oxyde völlig abgeht. Aehnlich wie das Aluminium ist das Beryllium befähigt, nicht nur Kationen, sondern auch Anionen zu bilden; sein Oxyd wirkt nicht nur als Base, sondern auch als schwache Säure. Auch die Isomorphieeigenschaften zwischen Beryllium und Magnesium sind nur sehr wenig ausgeprägt.

3. Darstellung. Als Ausgangsmaterial zur Herstellung von Berylliumpräparaten verwendet man am besten Beryll. Derselbe wird in feingepulvertem Zustand mit Kaliumcarbonat verschmolzen. Nach dem Erkalten trägt man die Schmelze vorsichtig in starke Schwefelsäure ein und erhitzt bis sich die Kieselsäure unlöslich abgeschieden hat. Man versetzt nun mit Wasser, filtriert, dampft bis zur beginnenden Kristallisation ein und läßt in der Kälte kris-

tallisieren. Man gießt dann die Mutterlauge vom ausgeschiedenen Alaun ab, konzentriert wieder und beseitigt so den größten Teil der Tonerde. Die filtrierte Lösung wird in eine warmgesättigte Lösung von Ammoncarbonat gegossen und einige Tage stehen gelassen. Die sich ausscheidenden Niederschläge von Eisen- und Aluminiumhydroxyd werden nochmals mit Ammoncarbonat extrahiert; die vereinigten Filtrate werden mit Salzsäure angesäuert und mit Ammoniak gefällt. Das ausgeschiedene Berylliumhydroxyd wird gewaschen und getrocknet. Es ist dann noch mit geringen Mengen Aluminium- und Eisenhydroxyd verunreinigt. Zur vollkommenen Reinigung verwandelt man das Hydroxyd in das Acetat und kristallisiert dieses aus Chloroform um.

Das Berylliummetall kann nach folgenden Methoden erhalten werden:

1. Man schmilzt Kaliumberylliumfluorid KBF_3 mit Kochsalz und Natrium in einem luftdicht verschlossenen Eisentiegel zusammen. Durch Auflösen der Schmelze in Wasser erhält man einen z. T. pulverförmigen, z. T. kristallisierten Rückstand. Die Kriställchen stellen das reine Metall dar.

2. Man reduziert frisch geglühte Beryllerde mit fein verteiltem Magnesiumpulver oder nach dem Thermitverfahren mit Aluminium.

3. Am leichtesten erhält man das reine Metall durch Elektrolyse der leicht schmelzbaren Doppelfluoride $NaBeF_3$ und Na_2BeF_4. Als positive Elektrode dient eine Graphitstange, als Schmelztiegel und zugleich als negative Elektrode ein Nickeltiegel. Bei Stromdurchgang scheidet sich das Beryllium in kleinen Kristallen an der Tiegelwand ab.

Das reine Metall besitzt in kompaktem Zustand eine silberweiße Farbe; es läßt sich schmieden und zu Blech auswalzen, sein spezifisches Gewicht ist 1,85, das Atomvolumen 4,9. Der Schmelzpunkt liegt unterhalb 1000°. Die spezifische Wärme ist

bei 0°	100°	200°	300°	400°	500°
0,3756	0,4702	0,5420	0,5910	0,6172	0,6206

Pulverförmiges Beryllium verbrennt mit heller Feuererscheinung. Von Wasser wird das Metall nicht angegriffen, wohl aber lösen verdünnte Säuren (mit Ausnahme von Salpetersäure) und fixen Aetzalkalien leicht auf. In der Spannungsreihe steht das Metall zwischen Zink und Magnesium.

4. Elektrochemie und analytische Chemie. Das Beryllium bildet in saurer Lösung das zweiwertige positive Ion $Be^{\cdot\cdot}$. Dieses Ion besitzt einen charakteristischen süßen Geschmack. Durch Hydroxylion in geringer Konzentration wird es gefällt z. B. durch Ammoniak auch bei Gegenwart von Chlorammonium. Hydroxylion höherer Konzentration bildet nach den Gleichungen $Be^{\cdot\cdot} + 3OH' = BeO_2H' + H_2O$ und $Be^{\cdot\cdot} + 4OH' = BeO_2'' + 2H_2O$ die komplexen sauerstoffhaltigen Anionen BeO_2H' und BeO_2'', deren Kalium- und Natriumsalze in Wasser leicht löslich sind. Natron- oder Kalilauge löst also Berylliumhydroxyd auf. CO_3''-Ion fällt basisches Carbonat unbestimmter Zusammensetzung; PO_4''' fällt bei Gegenwart von Ammonsalzen $BeNH_4PO_4$, welches gut kristallisiert und in kaltem Wasser sehr schwerlöslich ist. In überschüssigem Ammoncarbonat löst sich $Be^{\cdot\cdot}$ auf. Durch Kochen fällt aus dieser Lösung basisches Beryllcarbonat. Wässerige Aethylaminlösung fällt $Be^{\cdot\cdot}$ quantitativ aus.

Die Neigung zur Komplexbildung ist beim Beryllium erheblich größer als beim Magnesium. Mit Weinsäure, Aepfelsäure, Traubenzucker usw. bildet es komplexe Anionen. Aus Lösungen, die mit diesen Substanzen versetzt sind, ist es deshalb mit OH' nicht mehr fällbar. Schwächere Komplexe, durch welche die $Be^{\cdot\cdot}$-Reaktionen nicht aufgehoben werden, bildet es mit Oxalsäure, schwefliger Säure u. a.

Im analytischen Gang wird Beryllium mit Aluminium und Eisen zusammen erhalten. Von Eisen trennt man es durch Natronlauge, von Aluminium durch Ammoncarbonat oder wässeriges Aethylamin, in welchem letzteres leicht löslich ist. Gewogen wird Beryllium in der Form des glühbeständigen Oxyds.

5. Spezielle Chemie. Ob ein Berylliumwasserstoff existiert, ist nicht mit Sicherheit bekannt. Beryllium, welches durch Reduktion mit Mg im Wasserstoffstrom erhalten wird, ist stets stark wasserstoffhaltig. Näheres ist aber darüber nicht bekannt. Dagegen kennt man die entsprechenden Alkylverbindungen $Be(C_2H_5)_2$, farblose, an der Luft rauchende bei gelinder Erwärmung sich entzündliche, Flüssigkeit, Siedepunkt 186°, $Be(C_3H_7)_2$ Berylliumpropyl, Siedepunkt 245° nicht selbstentzündlich. Beide entstehen leicht durch Einwirkung von gepulvertem Berylliummetall auf Quecksilberäthyl bezw. -Propyl bei ca. 140°.

Berylliumchlorid $BeCl_2$ entsteht aus dem Metall beim Erhitzen im Chlorstrom oder Chlorwasserstoffstrom, auch bildet es sich, wenn das Berylliumoxyd im Strom von Tetrachlorkohlenstoff geglüht wird. Leicht schmelzbares und flüchtiges weißes Kristallpulver raucht an feuchter Luft infolge Salzsäureabspaltung. Beim Erhitzen an der Luft wird Chlor abgespalten unter Bildung von Berylliumoxyd, dagegen ist es unzersetzt sublimierbar in CO_2-Atmosphäre.

In Wasser löst sich das Chlorid unter starker Erwärmung auf. Aus der Lösung kristallisiert das Hydrat $BeCl_2 . 4H_2O$; monokline Tafeln, sehr zerfließlich, zerfallen beim Erhitzen nach $BeCl_2 . 4H_2O = BeO + 2HCl +$

$3H_2O$. Die wässerige Lösung des Chlorids ist hydrolytisch stark gespalten und reagiert deshalb sauer: bei 40° beträgt die Hydrolyse in Lösungen von 0,7 bis 0,2% Gehalt an $BeCl_2$ 2,1 bis 2,2% des gesamten Berylliumchlorids. Die Bildungswärme von $BeCl_2$ wasserfrei ist 155000 g-cal, die Lösungswärme 44500 g-cal. Beim Eindampfen von Berylliumchloridlösungen zur Trockne entstehen basische Chloride unbestimmter Zusammensetzung.

Berylliumbromid $BeBr_2$ entsteht bei schwacher Rotglut aus Metall und Brom, es sublimiert bei 450°. Seine übrigen Eigenschaften sind denen des Chlorid ähnlich.

Berylliumjodid BeJ_2 gewinnt man am besten aus dem Carbid Be_2C durch Erhitze nim Jodwasserstoffstrom. Sehr hygroskopische Kristalle, sie schmelzen bei 510° und sieden bei etwa 600°.

Berylliumhydroxyd $Be(OH)_2 . XH_2O$ entsteht in Form eines gelatinösen weißen Niederschlags aus Berylliumsalzlösungen durch Ammoniak. In der Kälte frisch gefällt ist es in Natron oder Kalilauge unter Bildung von Beryllaten leicht löslich. Bei langem Stehen, rascher beim Erhitzen, verliert es diese Löslichkeit zu einem großen Teil, desgleichen scheiden Beryllatlösungen beim Kochen das Hydroxyd rasch wieder ab. Berylliumhydroxyd zieht aus der Luft Kohlensäure an. Es geht schon beim Erhitzen auf 440° in das Oxyd über.

Berylliumoxyd BeO leichtes voluminöses Pulver d_4^{20} 2,964 entsteht auch aus dem Sulfat, Carbonat usw. durch Glühen; unschmelzbar im Knallgasgebläse, schmilzt und sublimiert aber leicht im Lichtbogen. Schwach erhitzt gewesenes BeO ist in verdünnten Säuren löslich, stark erhitztes nicht mehr. Konzentrierte Schwefelsäure verwandelt auch stark erhitztes Oxyd in Sulfat.

Kalium- und Natriumberyllat K_2BeO_2 und Na_2BeO_2. Wird frisch gefälltes $Be(OH)_2$ mit einer Lösung von Kaliumhydroxyd in absoluten Alkohol digeriert, so löst es sich auf und beim Eindampfen scheidet sich K_2BeO_2 ab. Aehnlich bildet sich das Na-Salz.

Berylliumperchlorat $Be(ClO_4)_2 . 4H_2O$, Berylliumperjodat $Be_3(JO_5)_2$ entstehen aus der betreffenden Säure und Berylliumkarbonat, beide sehr unbeständig.

Berylliumsulfat $BeSO_4$. Aus einer Lösung von Berylliumhydroxyd in verdünnter überschüssiger Schwefelsäure kristallisiert das Hydrat $BeSO_4 . 4H_2O$ in großen oktaedrischen Kristallen. Es ist löslich in etwa dem gleichen Gewicht von Wasser gewöhnlicher Temperatur; die Lösungswärme beträgt 850 cal. Die wässerige Lösung ist weniger hydrolisiert als die des Chlorids; die Hydrolyse einer 2,5prozentigen Lösung beträgt bei 40° 0,5%.

Die Aequivalentleitfähigkeit beträgt bei 25°

$v=32$	64	128	256	512	1024
$\Lambda=66,4$	77,0	88,7	99,4	112,6	124,4

Die Lösung nimmt reichliche Mengen Hydroxyd auf. Beim Eindampfen scheiden sich stark basische Produkte ab, die jedoch sicher keine chemischen Individuen sind. Es dürfte sich um Adsorptionsverbindungen handeln. Mit den Sulfaten der Alkalimetalle gibt das Berylliumsulfat Doppelsulfate vom Typus $K_2Be(SO_4)_2 . 2H_2O$.

Bei 100° verliert $Be(SO_4) . 2H_2O$ zwei Moleküle Wasser; bei weiterem Erhitzen entweichen die beiden übrigen und es entsteht $BeSO_4$, das beim Erhitzen auf Rotglut in SO_3 und BeO zu zerfallen beginnt. Bei Weißglut wird diese Reaktion vollständig.

Berylliumnitrat kristallisiert als $Be(NO_3)_2 . 3H_2O$ aus seinen Lösungen. Es ist sehr zerfließlich und gibt schon bei schwachem Erwärmen Salpetersäure ab. Die Hydrolyse beträgt bei einer 1,33%igen Lösung und 40° 1,8%.

Berylliumphosphate $Be_3(PO_4)_2 . 6H_2O$ flokkig amorpher Niederschlag und $BeHPO_4 . 4H_2O$ körnig kristallinisch entstehen beim Versetzen von Beryllium-Salz-Lösungen mit Na_3PO_4 bezw. Na_2HPO_4. Bei Gegenwart von Chlorammonium fällt $BeNH_4PO_4$, das beim Glühen in $Be_2P_4O_7$ Pyrophosphat übergeht.

Als schwache Base bildet das Berylliumhydroxyd mit Kohlensäure nur ein sehr unbeständiges Salz, das durch Hydrolyse in basische Salze unbestimmter Zusammensetzung übergeht und durch Erwärmen leicht alle Kohlensäure verliert. Das normale Carbonat kann man mit der Zusammensetzung $BeCO_3 . 4H_2O$ aus einer mit Kohlensäure gesättigten Lösung von $Be(OH)_2$ in kohlendioxydhaltigem Wasser erhalten. Das normale Salz sowie die basischen Produkte sind in Ammoncarbonat leicht löslich.

Berylliumortosilikat Be_2SiO_4 findet sich als Phenakit in der Natur.

Berylliumkarbid Be_2C wird durch Erhitzen eines Gemenges von Berylliumoxyd und Zuckerkohle im elektrischen Ofen dargestellt. Rötliche hexagonale Kristalle von großer Härte. Gibt mit Säure und Alkalien Methan

$$Be_2C + 4H_2O = 2Be(OH)_2 + CH_4$$

Berylliumacetat. Aus der Lösungdes Hydroxyds in heißem Eisessig kristallisiert in der Kälte das basische Acetat $BeO . 3Be(C_2H_3O_2)_2$ in Oktaedern. Diese Substanz hat sehr merkwürdige Eigenschaften. Sie löst sich in Alkohol, Eisessig, Aceton, Benzaldehyd, Phosphortrichlorid, Malon- und Acetessigester

und namentlich in Chloroform. Sie schmilzt bei 283—284° und destilliert unzersetzt bei 330°.

Berylliumoxalate. Berylliumhydroxyd löst sich leicht in Oxalsäure auf. Beim Eindampfen kristallisiert $Be(C_2O_4).3H_2O$. Mit Alkalioxalaten bildet es Doppeloxalate vom Typus $\{Be(C_2O_4)_2\}K_2$ usw.

Berylliumtartrat $BeC_4H_4O_6.3H_2O$ entsteht leicht aus den Komponenten. Bei der Einwirkung von $Be(OH)_2$ auf Bitartratlösungen bilden sich die Alkalisalze zweier hochkomplexer Berylliumweinsäuren, deren Anionen die Formeln

$\{B_4O_5(C_4H_4O_5)_2\}''$ bezw. $\{B_2O_3(C_4H_4O_5)_2\}''$ zukommen.

Aus $Be(OH)_2$ und Acetylaceton entsteht die salzartige Verbindung $Be(C_5H_7O_2)_2$, welche in allen organischen Lösungsmitteln leicht löslich ist, bei 108° schmilzt und bei 270° unzersetzt destilliert.

6. **Photochemie.** Die Berylliumsalze geben kein Flammenspektrum; die charakteristischen Linien des Bogenspektrums sind $\mu\mu$ 457,3 448,9 313,1 313,0 265,1.

Literatur. ***Dammer***, *Handbuch der anorganischen Chemie Bd. II, 2, 1894 und Bd. IV Stuttgart 1903.* — ***Abeggs** Handbuch der anorganischen Chemie, Bd. II, 2, Leipzig 1905.* — ***Moissan**, Traité de chemie minerale, Bd. III, 1903.* — ***Naumann-Zirkel**, Elemente der Mineralogie, Leipzig 1901.*

O. Hauser.

b) Magnesium.

Mg. Atomgewicht 24,32.

1. Geschichte und Vorkommen. 2. Wertigkeit und Stellung im periodischen System. 3. Elektrochemie und analytische Chemie. 4. Darstellung und Eigenschaften. 5. Spezielle Chemie. 6. Photochemie.

1. **Geschichte und Vorkommen.** Trotz der weiten Verbreitung, die einzelne Verbindungen des Magnesiums in der Natur haben, ist man verhältnismäßig spät dazu gekommen, bewußte Verwendung von ihnen zu machen. Das unter dem Namen Bittersalz bekannte Sulfat dieses Elementes wurde von N. Grey zuerst aus dem Wasser der Epsomer Quelle dargestellt und 1695 beschrieben. In der Folge erkannte man, daß das Epsomer Salz in vielen anderen Mineralquellen und auch in Meerwasser enthalten ist. Etwa um dieselbe Zeit wurde das basische Magnesiumcarbonat unter dem Namen Magnesia alba in der Arzneikunde eingeführt ohne daß man zunächst näheres über ihre eigentliche Natur wußte. Sie wurde vielmehr vielfach mit Calciumcarbonat verwechselt. Erst Black wies 1755 die Verschiedenheit der beiden Substanzen mit Bestimmtheit nach, und erkannte die Magnesia alba als das Carbonat einer eigentümlichen Erde, die er nun Magnesia nannte. Genauer untersucht wurde die Magnesia 1775 von Bergmann. Das Metall wurde zuerst von Bary hergestellt.

Das Magnesium gehört zu den verbreitetsten Elementen. Nach Clarke bildet es 2,40 % der festen Erdrinde und 0,14 % der auf der Erde vorhandenen gesamten Wassermenge. Es ist auch ein integrierender Bestandteil des Tier- und Pflanzenkörpers, speziell von Samen, Knochen, Blut, Milch usw. Besonders wichtig erscheint es nach Willstätter für das Chlorophyll zu sein.

Als gesteinsbildende Mineralien treten seine Silikate auf: Olivin $Mg_2(Fe_2)SiO_4$ (ca. 49 % MgO); Enstatit (ca. 40 % (MgO; Talk (auch Steatit) $Mg_3H_2(SiO_3)_4$ (31,7 % MgO); Serpentin $Mg_3Si_2O_7.2H_2O$ (43,5 % MgO); Meerschaum $Mg_2Si_3O_8.4H_2O$ (ca. 24 % MgO). Als accessorische Bestandteile von Gesteinen treten häufig auf: Spinell $MgAl_2O_4$ (28,1% MgO); Magnoferrit $MgFe_2O_4$ (16% MgO); selten Periklas MgO und Brucit $Mg(OH)_2$ (68,9 % MgO); gebirgsbildend tritt es auf als Dolomit $Mg.Ca(CO_3)_2$ (16—21,9 % MgO); auch Magnesit $MgCO_3$ (47,6 % MgO) kommt in größeren Ablagerungen vor und bildet einen bedeutenden Handelsartikel. In außer ordentlich reicher Menge ist das Magnesium ferner enthalten in den mächtigen Salzlagerstätten der Zechsteinformation Mitteldeutschlands und der norddeutschen Tiefebene. Das wichtigste derselben ist der Carnallit $MgCl_3.6H_2O$ (34 % $MgCl_2$). Zersetzungsprodukte des Carnallits sind Bischoffit $MgCl_2.6H_2O$ (46,8 $MgCl_2$). Tachhydrid $\{Mg_2Cl_6\}Ca.12H_2O$ (36,8% $MgCl_2$); Kainit $MgSO_4.KCl.3H_2O$ (16,1% MgO); Kieserit $MgSO_4.H_2O$ (28,9 % MgO), sowie die seltener vorkommenden Salze: Schönit $\{Mg(SO_4)_2\}K_2.6H_2O$ (9,9 % MgO); Leonit $\{Mg(SO_4)_2\}K_2.4H_2O$ (10,8% MgO); Langbeinit $\{Mg_2(SO_4)_2\}$ K_2 19,3 % MgO); Astrakanit $\{Mg(SO_4)_2\}Na_2.4H_2O$ (11,97% MgO); Löweit $Mg(SO_4)_2Na_2.2H_2O$; Polyhalit $MgSO_4.2CaSO_4.K_2SO_4.2H_2O$ (6,6 % MgO). Außerdem findet sich das Magnesium noch in den Boraten bezw. Phosphaten Boracit $2Mg_3B_8O_{15}MgCl_2$ (26,9 % MgO); Struvit $NH_4MgPO_4.6H_2O$ (16,3 % MgO); Wagnerit $Mg_3(PO_4)_2.MgF_2$ (49,3 % MgO).

2. **Wertigkeit und Stellung im periodischen System.** Die Wertigkeit des Magnesiums ergibt sich zu 2 aus folgenden Gesichtspunkten: Der Abfall der äquivalenten Leitfähigkeit von Magnesiumsulfat Λ 1024—Λ 32 = 41,0 entspricht dem für zweiwertige Ionen erforderlichen Wert. Das Magnesium zeigt eine sehr vollkommene Isomorphie mit dem zweifellos zweiwertigen Zink und den Metallen Eisen und Mangan in ihrer

zweiwertigen Form. Eine höhere Oxydationsstufe des Mg ist nicht bekannt.

Unter der Annahme der Zweiwertigkeit ergibt sich als Atomgewicht aus den Beziehungen $MgSO_4 : MgO$ und $MgCl_2 : 2Ag$ der Wert Mg = 24,32. Als Atomwärme ergibt sich mit Benutzung dieser Zahl der normale Wert 6. Danach charakterisiert sich das Magnesium als das zweite Glied der zweiten Gruppe des periodischen Systems und zeigt als solches Analogien sowohl mit der Untergruppe der Erdalkalien als auch, allerdings in geringerem Grade, mit der negativeren Untergruppe Zink, Cadmium, Quecksilber. Von den Erdalkalien unterscheidet es sich durch seine viel geringere Basizität.

Das Potential $Mg/1nMg^{\cdot\cdot}$ ist ca. 1,31 Volt. Es nähert sich also in seinem elektrochemischen Verhalten dem Aluminium. Auf kaltes Wasser wirkt es praktisch nicht ein, bei siedendem Wasser tritt schwache Wasserstoffentwickelung auf. In Säuren löst es sich leicht unter Wasserstoffentwickelung; merkwürdig ist, daß auch in manchen Metallsalzlösungen (Alkalichloriden, Sulfaten, Erdalkalichloriden) Wasserstoffentwickelung eintritt. Aus den neutralen Lösungen der Schwermetalle werden diese durch Magnesium ausgefällt. Mit Methylalkohol bildet Magnesium bei 200° Magnesiummethylat $Mg(CH_3O)_2$. Von alkalischen Flüssigkeiten wird es nicht verändert.

3. Elektrochemie und analytische Chemie. Magnesium bildet in verdünnten Lösungen das farblose Ion $Mg^{\cdot\cdot}$, welches durch einen bitteren Geschmack gekennzeichnet ist. Obgleich die Elektroaffinität erheblich schwächer ist als bei den Erdalkalimetallen, ist sie immer noch ausreichend, keine merkliche Hydrolyse eintreten zu lassen, die Magnesiumsalzlösungen reagieren neutral. Die Beweglichkeit des Magnesiumions bei 18° und unendlicher Verdünnung beträgt 48 bis 49. Die Dissoziation der Magnesiumsalze ist auch bei sehr großen Verdünnungen nicht vollständig. Zum Unterschied von den Ionen der Erdalkalimetalle und in Anlehnung an das Zink zeigt das Magnesium in den konzentrierten Lösungen seiner Salze eine merkliche Tendenz zur Bildung von Komplexionen, die sich in der Existenz zahlreicher Doppelsalze, sowie in abnormen Werten der Wanderungsgeschwindigkeit, des Leitvermögens sowie der Gefrierpunktserniedrigung zu erkennen gibt.

Schwerlösliche Niederschläge gibt $Mg^{\cdot\cdot}$ mit folgenden Anionen: OH', CO_3'', C_2O_4'' und PO_4''' oder HPO_4''. Salze dieser Anionen fällen also Magnesium aus seinen Lösungen aus. $Ba(OH)_2$, KOH und NaOH fällen es so gut wie vollständig als Hydroxyd. Auch durch Quecksilberoxyd kann Magnesium aus der Lösung seines Chlorids (nur aus dieser) quantitativ als Hydroxyd abgeschieden werden, da nach der Gleichung $HgO + 2Cl' + H_2O = HgCl_2 + 2OH'$ genügend Hydroxylionen gebildet werden, um das Löslichkeitsprodukt $[Mg^{\cdot\cdot}] . [OH']^2 = 4.10^{-8}$ zu überschreiten. Bei Gegenwart von Chlorammonium und Ammoniak fällen lösliche Phosphate (Ammonphosphat) den gut kristallisierenden schwer löslichen Niederschlag $Mg(NH_4)PO_4 . 6H_2O$ aus. $Ba[OH]_2$ $(NH_4)_2 . HPO_4$ und HgO können alle drei mit Vorteil zur Abtrennung des Magnesiums von den Alkalien dienen. Ammoniak fällt das Magnesium unvollständig als Hydroxyd, bei Gegenwart von Chlorammonium bleibt die Fällung aus, da durch den Zusatz von Ammoniumionen die an und für sich schon geringe Hydroxylionenkonzentration des Ammoniums so verringert wird, daß sie zur Ueberschreitung des Löslichkeitsprodukts $[Mg^{\cdot\cdot}] . [OH']^2 = 4.10^{-8}$ nicht mehr ausreicht. Carbonate fällen basisches Carbonat wechselnder Zusammensetzung; bei Gegenwart von Ammoniumsalzen bleibt auch diese Fällung aus. SH' fällt als Hydroxyd, da MgS nach der Gleichung $MgS + 2H_2O = Mg(OH)_2 + H_2S$ hydrolysiert werden würde. Auch diese Fällung wird natürlich durch Chlorammonium verhindert. Durch die Nichtfällbarkeit mittels Schwefelammonium (bezw. Ammoniak) läßt sich das Magnesium leicht von den übrigen Metallen trennen. Die Scheidung von den Erdalkalien ist durch die Nichtfällbarkeit mittels Carbonat bei Gegenwart von Ammonsalz gegeben. Zur Scheidung von Calcium kann auch der Löslichkeitsunterschied der Oxalate benutzt werden. Da die Komplexbildung beim Magnesium in verdünnten Lösungen nur sehr unbedeutend ist, beeinflußt sie die Reaktionen nicht. Wägungsform für das Magnesium sind das Oxyd und das Pyrophosphat, in welches Salz das Magnesiumammoniumphosphat beim Glühen übergeht: $2MgNH_4PO_4 . 6H_2O = Mg_2P_2O_7 + 7H_2O + 2NH_3$.

4. Darstellung und Eigenschaften. Das Magnesiummetall kann dargestellt werden durch Reduktion des wasserfreien Chlorids oder besser eines Gemenges desselben mit Kalium- oder Natriumchlorid mittels Natrium. Vorteilhafter ist es, das Metall durch Schmelzelektrolyse entwässerten Carnallits zu gewinnen. Das nach diesen Methoden erhaltene rohe Metall wird durch Destillation im Leuchtgas- oder Wasserstoffstrom gereinigt.

Das Magnesium ist ein hämmerbares, silberweißes Metall, das an der Luft durch eine Oxydhaut ein graues unscheinbares Aussehen bekommt. Das spezifische Gewicht

ist 1,75, die Härte 3, die elektrische Leitfähigkeit ist bei 0° $24,47 \times 10^{-4}$
100° $17,50 \times 10^{-4}$.

Die absolute Wärmeleitfähigkeit ist zwischen 0 und 100° 37,60. Die spezifische Wärme beträgt (50°) 0,2519 und (0°) 0,2456 g-cal. Der Schmelzpunkt liegt unterhalb 800°, der Siedepunkt bei etwa 1100. Das Atomvolumen ist 13,9, die Atomrefraktion 6,9.

5. Spezielle Chemie. An trockner Luft beständig, wird es durch feuchte Luft langsam oxydiert. Beim Erhitzen an der Luft verbrennt es mit einer weißen Flamme, welche sehr reich an den brechbaren Strahlen und von außerordentlicher Lichtintensität ist. Obgleich die Temperatur der Flamme nur ca. 1400° beträgt, werden 10% der gesamten Energie in Licht verwandelt. Nach Bunsen-Roscoe liefert 1 g Magnesium beim Verbrennen ebensoviel Licht wie 139 g Stearin in Form einer Kerze. Die Wärmetönung $Mg+O=MgO$ ist 144000 g-cal. Diese Oxydationswärme ist höher als die der Erdalkalimetalle, es entspricht ihr eine sehr große Affinität des Magnesiums zum Sauerstoff, so daß es möglich ist, nahezu alle Metalloxyde und Carbonate durch Mg-Pulver zu reduzieren, sehr leicht z. B. die Schwermetalloxyde. Aber auch zur Herstellung der Alkalimetalle (z. B. Cs, Rb, K) kann man sich mit großem Vorteil des Magnesiums bedienen. Da sich hierbei (vgl. Darstellung des Mg) zweifellos Gleichgewichte einstellen, die Reaktion somit unvollständig ist, muß das Alkalimetall zur vollständigen Reduktion im indifferenten Gasstrom abdestilliert werden. Die Oxyde der Metalloide: H_2O, CO, CO_2, SO_2, NO usw. werden durch Mg glatt zerlegt. In CO_2 vermag angezündetes Mg sogar weiterzubrennen. Mit den meisten anderen negativen Elementen verbindet sich das Magnesium beim Erhitzen mit mehr oder minder großer Leichtigkeit, also mit Cl_2, S_8, Br_2, Fl_2, N_2, P_4, As_4, B, Si, dagegen anscheinend nicht mit Kohlenstoff.

Beim Erhitzen eines Gemenges von Mg und MgO im Wasserstoffstrom findet eine Absorption dieses Gases statt. Es ist jedoch nicht sicher festgestellt, ob sich wirklich ein Hydrür dabei bildet. Mit Aryl- und Alkylresten dagegen vereinigt sich das Magnesium leicht zu wohlcharakterisierten und sehr wichtigen Verbindungen. Man erhält sie durch Einwirkung von Magnesiumfeile auf die betreffenden Quecksilberverbindungen in geschlossenem luftfreiem Rohr. Sie bilden bei gewöhnlicher Temperatur feste Substanzen und sind außerordentlich reaktionsfähig, entzünden sich z. B. selbst an der Luft und werden von Wasser glatt unter Bildung der betreffenden Kohlenwasserstoffe zersetzt, z. B. $Mg(CH_3)_2+H_2O=Mg(OH)_2+2CH_3$. Sie bilden sich auch bei der Einwirkung von Mg-Metall auf die Alkyl- oder Aryljodide. Gewöhnlich ist aber diese Reaktion nicht durchgreifend, und es entstehen an ihren Stelle Aryl- oder Alkyl-Magnesiumjodide, z. B. $Mg + C_6H_5J = Mg\langle^{C_6H_5}_{J}$. In diesen Verbindungen sind die organischen Reste außerordentlich reaktionsfähig. Sie werden deshalb zu vielen synthetischen Reaktionen benutzt (Grignardsche Reaktion).

Magnesiumoxyd MgO entsteht beim Verbrennen des Magnesiummetalls an der Luft oder durch Glühen des Hydrats, Carbonats, Nitrats oder durch Zersetzen der Halogenide mit Wasserdampf bei höherer Temperatur. Das durch Glühen des Carbonats erhaltene Oxyd ist ein lockeres leichtes Pulver, die Magnesia usta des Handels. Die Dichte der Magnesia usta ist je nach Dauer und Temperatur des Erhitzens verschieden. Das Oxyd ist sehr schwer schmelzbar, beginnt aber schon bei verhältnismäßig niederer Temperatur zu sublimieren (etwa 1400°). Es setzt sich dann in ziemlich großen Oktaedern, der Form des natürlich vorkommenden MgO (Periklas) an kälteren Stellen ab. Diese Kristalle haben die Dichte 3,57.

Magnesiumhydroxyd $Mg(OH)_2$ entsteht aus dem Oxyd und Wasser oder beim Fällen von Magnesiumsalzlösungen mit Aetzalkalien, z. B. Aetzkalk, Natronlauge usw. Es verliert bei 100° noch kein Wasser, zersetzt sich aber bei Rotglut: $Mg(OH)_2 = MgO + H_2O$. Es absorbiert an der Luft Kohlensäure. In Wasser ist es so weit löslich, daß die Lösung noch deutliche alkalische Reaktion zeigt. Aus der elektrischen Leitfähigkeit ergibt sich der Wert der Löslichkeit bei 18° mit 0,01 g/L = 0,0002 g Mol/L; in Lösungen der Alkalisalze ist die Löslichkeit höher, in Chlorammoniumlösungen löst es sich infolge des Vorgangs $OH'+NH_4^{\cdot}=NH_3+H_2O$ leicht auf. Die Wärmetönung $MgO+H_2O=Mg(OH)_2$ beträgt 5000 g-cal.

Magnesiumhydroperoxyd soll bei der Elektrolyse von $MgCl_2 + H_2O_2$ entstehen.

Magnesiumsulfid MgS; aus dem Metall und Schwefel beim Erhitzen, oder aus dem Nitrid durch Erhitzen im H_2S-Strom $Mg_3N_2+3H_2S=3MgS+2NH_3$. Schmutzig gelbe poröse Masse zerfällt mit Wasser sehr leicht nach der Gleichung $MgS+2H_2O=Mg(OH)_2+H_2S$. Die Wärmetönung der Reaktion $Mg+S=MgS$ ist 77600 g-cal.

Magnesiumnitrid Mg_3N_2; aus den Komponenten bei heller Rotglut oder auch aus dem Metall beim Erhitzen in Ammoniakstrom. Grünlich braunes Pulver, verbrennt an der Luft zu Oxyd, zersetzt sich mit

Wasser in $Mg(OH)_2$ und Ammoniak nach der Gleichung $Mg_3N_2 + 3H_2O = 2Mg(OH)_2 + 2NH_3$.

Beim Erwärmen vermag es mit vielen Metallchloriden seinen Stickstoff gegen Chlor auszutauschen unter Bildung der betreffenden Metallnitride, so z. B. mit Fe, Ni, Co, Cr, Ag, Pb, Hg, Cu.

Magnesiumphosphid Mg_3P_2; aus den Komponenten beim Erhitzen erhältlich, wird von Wasser sehr leicht zersetzt: $Mg_3P_2 + 3H_2O = 3Mg(OH)_2 + 2PH_3$.

Magnesiumarsenid; Mg_3As_2 durch Glühen von Magnesiumpulver mit Arsen im Wasserstoffstrom. Wird von Wasser analog dem Phosphid und Nitrid zersetzt.

Magnesiumborid Mg_3B_2 entsteht durch Erhitzen von Mg mit amorphem Bor, auch bei der Reduktion von Bortrioxyd oder Bortrichlorid mit überschüssigem Magnesium; es gibt mit Säuren BH_3.

Magnesiumcarbid erhält man bei vorsichtigem Erwärmen von Magnesiumpulver im Acetylenstrom.

Magnesiumsilicid Mg_2Si wird erhalten durch Reduktion von Na_2SiF_6 mit Mg. Auch beim Erhitzen von Mg-pulver mit fein gepulvertem SiO_2 (Infusorienerde); gibt mit verdünnter Salzsäure SiH_4: $Mg_2Si + HCl = SiH_4 + 2MgCl_2$.

Magnesiumchlorid $MgCl_2$ entsteht leicht aus den Elementen beim Erhitzen, aber auch aus dem Oxyd, wenn es mit Kohle gemischt wird, und Chlor bei heller Rotglut $MgO + C + Cl_2 = MgCl_2 + CO$. Viel einfacher erhält man es aus dem Doppelsalz $\{MgCl_3\}NH_4.6H_2O$ beim Erhitzen; schimmernde Kristalle vom Schmelzpunkt 708° und mit dem spezifischem Gewicht 2,177. Beim Erwärmen mit Wasserdampf bildet es von ca. 140° an Salzsäure nach der Gleichung $MgCl_2 + H_2O = MgO + 2HCl$. An trockner Luft ist es beim Erhitzen beständig. In Wasserstoff, Stickstoff usw. sublimierbar. Es ist außer in Wasser auch in Alkohol und anderen organischen Lösungsmitteln löslich, z. B. in Aceton, Essigester und Amylalkohol. Die Bildungswärme $Mg + Cl_2 = MgCl_2$ ist: 151000 g-cal. Bei der Bildung einer verdünnten Lösung aus dem Chlorid werden 45907 g-cal entbunden.

Aus den wässerigen Lösungen des Chlorids kristallisiert zwischen dem kryohydratischen Punkt — 33,6° bis — 16,8° das Hydrat $MgCl_2.12H_2O$; bei — 16,8° geht dieses in das Oktohydrat $MgCl_2.8H_2O$ über, welches sich seinerseits bei — 3,4° in das Hexahydrat $MgCl_2.6H_2O$ umwandelt. Außer der gewöhnlichen im genannten Temperaturbereich stabilen Modifikation (α) kommt das Oktohydrat noch in einer stets instabilen β-Form vor.

Das Hexahydrat ist stabiler Bodenkörper zwischen — 3,4° und 116,67, wo es einen scheinbaren Schmelzpunkt besitzt, der in Wirklichkeit die Umwandlung in $MgCl_2.4H_2O$ und eine daran gesättigte Lösung bezeichnet, welch letzteres bis 182° stabil bleibt. Bei dieser Temperatur tritt erneut eine Schmelzung ein und es scheidet sich $MgCl_2.2H_2O$ ab. Jedoch setzt schon bei ca. 140° eine merkliche Abspaltung von Salzsäure ein, so daß es sich empfiehlt, die Entwässerung im HCl-Strom vorzunehmen.

Eine Uebersicht über die Löslichkeitsverhältnisse bei den Umwandlungspunkten gibt nachstehende Tabelle, in welcher die Anzahl Mole Wasser verzeichnet sind, welche bei der betreffenden Temperatur zur Bildung einer 1 Mol $MgCl_2$ enthaltenden gesättigten Lösung benötigt werden.

$$MgCl_2.12H_2O \; \frac{-33{,}6^0}{20{,}3} \; \frac{-16{,}8^0}{11{,}43} \; (\alpha MgCl_2.8H_2O) \; \frac{-3{,}4^0}{10{,}1} \; (MgCl_2.6H_2O) \; \frac{116{,}67^0}{6{,}18}$$

$$(MgCl_2.4H_2O) \; \frac{181{,}5^0}{4{,}2} \; (MgCl_2 2H_2O) \; \frac{186^0}{4{,}15}.$$

Die spezifische Leitfähigkeit $\varkappa$ 10^4 bei 18° ist

Gewichtsprozente der Lösung =	5%	10%	20%	30%	39%
	683	1128	1402	1061	768

Die äquivalente Leitfähigkeit verd. Lösungen bei 25°

v =	32	64	128	256	512	1024
	108,2	113,5	118	121,6	124,6	127,4

Die Viskosität ist bei 25°

Normalität der Lösung =	1	0,5	0,25	0,125
	1,2015	1,0940	1,0415	1,0206

Carnallit $\{MgCl_3\}K.6H_2O$. Aus Lösungen, die gleichzeitig Magnesiumkaliumchlorid enthalten, kristallisiert der Carnallit aus, wenn eine der beiden Komponenten in großem Ueberschuß über das durch die Formel gegebene Molekularverhältnis vorhanden ist. Die Verhältnisse werden ersichtlich aus folgender Uebersicht:

Sättigung an Carnallit und Chlorkalium

Temp.	Mole H_2O	Mole $MgCl_2$	Mole KCl
0°	100	6,71	0,73
25°	,,	7,27	1,15
61°	,,	8,06	1,74
154°	,,	12,4	3,4

Sättigung an Carnallit und Chlormagnesium

Temp.	H_2O	$MgCl_2$	KCl
25°	100	10,5	0,2
115,7°	,,	16,2	0,4
152,0°	,,	20	2,4

Die linksstehenden Lösungen liefern Carnallit neben Chlormagnesium, die rechtsstehenden Carnallit neben Chlorkaliumlösungen, die in der Zusammensetzung zwischen den durch diese Werte angezeigten Grenzen stehenden liefern reinen Carnallit. Andererseits muß Carnallit, wie aus diesen Zahlen hervorgeht, beim Behandeln mit Wasser in allen Fällen partiell in sich ausscheidendes Chlorkalium und in eine Magnesiumchlorid neben wenig Chlorkalium enthaltende Lösung zersetzt werden. Für 25° z. B. läßt sich der Vorgang durch folgende Gleichung ausdrücken: $\{MgCl_3\}K.6\,H_2O + 7{,}8\,H_2O = 0{,}84KCl$ fest + $(MgCl_2,\ 0{,}16\,KCl,\ 13{,}8\,H_2O)$ Lösung, das heißt bei 25° können aus dem Carnallit 84% des Kaliums durch Kristallisation ausgeschieden werden.

Bei —21° liegt die unterste Grenze, bei der Carnallit mit seiner Lösung in Gleichgewicht sein kann. Unterhalb dieser Temperatur zerfällt er vollständig nach der Gleichung $(MgCl_3)K.6H_2O + 6H_2O = MgCl_2.12H_2O + KCl$. Carnallit bildet an der Luft zerfließliche rhombische Kristalle von spezifischen Gewicht 1,16.

Ammoniummagnesiumchlorid $(MgCl_3)$-$NH_46.H_2O$ kristallisiert leicht aus dem Gemisch der Lösungen der einfachen Salze Rhomboeder oder rhomboedrische Säulen vom spezifischen Gewicht 1,456, in Wasser leicht löslich, an der Luft zerfließend, liefert beim Erhitzen wasserfreies Chlormagnesium ohne Abspaltung von Salzsäure.

Magnesiumbromid $MgBr_2$ wird analog dem Chlorid erhalten. Kleine weiße hygroskopische Kristalle. Aus seiner wässerigen Lösung kristallisiert $MgBr_2.6H_2O$, aus mit KBr versetzten Lösungen das dem Carnallit isomorphe $K\{MgBr_3\}.6H_2O$, welches als isomorphe Beimengung dem natürlich vorkommenden Carnallit beigemengt ist und zur technischen Gewinnung des Broms dient.

Magnesiumjodid MgJ_2 aus den Komponenten beim Erhitzen; sehr hygroskopische, farblose Kristalle, geben an der Luft HJ ab. Aus der Lösung kristallisieren die Hydrate $MgJ_2.10H_2O$ und $MgJ_2.8H_2O$.

Magnesiumfluorid MgF_2. Dieses Salz unterscheidet sich von den übrigen Halogeniden des Magnesiums durch seine Schwerlöslichkeit. Es bildet sich leicht aus Magnesiumoxyd und Flußsäure und ist auch dadurch ausgezeichnet, daß es sich ohne besondere Maßregeln unzersetzt schmelzen läßt. Die Löslichkeit in Wasser ist nur 7,6 mg/L = 1,4 Millimol bei 18°, also niedriger als die des Hydroxyds. Fluoresziert beim Erhitzen und phosphoresziert nach Belichtung. Das spezifische Gewicht ist 2,472. Mit den Alkalifluoriden bildet es Doppelsalze.

Magnesiumchlorat, Magnesiumbromat und Magnesiumjodat $Mg(ClO_3)_2.6H_2O$, $Mg(BrO_3)_2.6H_2O$, $Mg(JO_3)_2.4H_2O$; aus Magnesiumhydroxyd und den betreffenden Säuren, zerfließliche, sehr leicht lösliche aber beim Erhitzen ziemlich beständige Salze. Das Chlorat beginnt sich bei 190° zu zersetzen, das Bromat bei 200° und das Jodat erst bei höherer Temperatur.

Magnesiumperjodat $Mg(JO_4)_2.10H_2O$. Aus Magnesium und überschüssiger Säure beim Einengen der entstandenen Lösung; sehr leicht löslich. Enthält die der Darstellung dienende Lösung keine freie Säure, so entstehen komplizierter zusammengesetzte Produkte.

Magnesiumsulfat $MgSO_4$ entsteht aus seinen Hydraten beim Erhitzen auf 200°. Bei heller Rotglut zersetzt es sich unter Abgabe von SO_3 und Bildung von MgO. Sein spezifisches Gewicht ist 2,65. In Wasser löst es sich nur sehr träge unter Wärmeentwicklung auf. Der kryohydratische Punkt der Lösung liegt bei —3,9. Es scheidet sich hier neben Eis das Dodekahydrat $MgSO_4.12H_2O$ aus, das in Berührung mit Lösung schon bei +1,8° in Heptahydrat, gewöhnlich Bittersalz genannt, $MgSO_4.7H_2O$, übergeht. Dieses Salz kristallisiert rhombisch bisphenidisch (a : b : c = 0, 9901 : 1 : 0,5709); sein spezifisches Gewicht ist 1,68. Es ist isomorph und mischbar mit $ZnSO_4.7H_2O$, $NiSO_4.7H_2O$; isodimorph und beschränkt mischbar mit $CoSO_4.7H_2O$ und $FeSO_4.7H_2O$. Entsprechend dieser Isodimorphie kommt es vor. Die Löslichkeit der rhombischen Form vor. Die Löslichkeit der rhombischen Form ist bei

0°	10°	20°	30°	40°	
26,9	31,5	36,2	40,9	45,6	Tl. auf 100 Tl. Wasser.

Ueber 48,3° kristallisiert das Magnesiumsulfat als Hexahydrat $MgSO_4.6H_2O$, monoklinprismatisch. Auch dieses Hydrat existiert in einer zweiten, tetragonalen, Form. Oberhalb 67 bis 68° wandelt sich das Bittersalz in Berührung mit seiner Lösung in Kieserit $MgSO_4.H_2O$ um. Kieserit ist als solcher in

Wasser fast unlöslich. Seine Existenzbedingungen nach oben hin sind noch nicht festgelegt; die Dichte ist 2,569. Da er durch Wasseraufnahme langsam in $MgSO_4.7HO$ übergeht, läßt er sich durch Anrühren mit wenig Wasser in fest verbackende Blöcke formen und bildet als Blockkieserit die Großhandelsform des Magnesiumsulfats. Durch vollständigen Uebergang in Heptahydrat wird er natürlich leicht wasserlöslich. Wird Bittersalz trocken entwässert, so erhält man bei 77,5° das Pentahydrat $MgSO_4.5H_2O$ und bei wenig höherer Temperatur das Tetrahydrat $MgSO_4 4H_2O$. Beide Salze lassen sich auch aus wässerigen Lösungen von Magnesiumsulfat gewinnen, wenn deren Wasserdampftension durch Zusatz anderer Salze (z. B. Chlormagnesium) herabgesetzt wird. Die oben angedeutenden Bildungsbedingungen erleiden dann natürlich eine vollkommene Verschiebung.

Spezifische Leitfähigkeit bei 18° $\varkappa$ 10^4

% $MgSO_4$	5	10	15	20	25
	263	414	430	476	415

Aequivalente Leitfähigkeit bei 25°

v	32	64	128	256	512	102,4
Λ	73	83	92,6	101,8	110,1	116,9

Die Bildungswärme aus den Elementen ist $Mg + S + 4O = MgSO_4 + 302\,300$ g-cal. Die Hydratations- und Lösungswärmen ergeben sich aus folgenden Zahlen $MgSO_4 \rightarrow$ verdünnte Lösung 20300 g-cal, $MgSO_4.H_2O \rightarrow$ verdünnte Lösung 13300 g-cal, $MgSO_4.7H_2O \rightarrow$ verdünnte Lösung —3800 g-cal. Die Viskosität einer ½ normalen Lösung beträgt 1,3673.

$Mg(SO_4H)_2$ kristallisiert aus einer Lösung von $MgSO_3$ in heißer Schwefelsäure; als ein Salz dieser Säure ist $Mg(SO_4)HK.2H_2O$ anzusehen, das bei Einengen einer mit Schwefelsäure versetzten Lösung von $MgSO_4$ und K_2SO_4 entsteht.

Schönit $Mg(SO_4)_2K_2.6H_2O$ ist das neutrale Salz der vorgenannten Säure. Er kristallisiert aus dem Lösungsgemisch der Einzelsalze bei gewöhnlicher Temperatur in monoklinen prismatischen Kristallen. Bei —3° zerfällt er in seine Komponenten. Der kryohydratische Punkt liegt bei —4°. Bei 47,5° spaltet der Schönit Wasser ab und geht in Leonit $Mg(SO_4)_2K_2.4H_2O$ über. Auch die Bildungstemperatur des Leonits kann durch Herabsetzung des Dampfdrucks der Mutterlauge vermittels fremder Salze bis unterhalb 20° herabgedrückt werden. Aus dem Leonit entsteht der Langbeinit $\{Mg_2(SO_4)_3\}K_2$ durch Abspaltung von Kaliumsulfat und Wasser. Bei Gegenwart von MgSulfat tritt er schon bei etwa 61° auf. Ohne fremde Zusätze wird er etwa bei 85° stabil, durch Zusätze von fremden Salzen kann seine Bildungstemperatur bis auf 37° herabgedrückt werden. Er entsteht auch durch Zusammenschmelzen der Komponenten.

Ammoniummagnesiumsulfat (Cerbolit) $Mg(SO_4)_2(NH_4)_2.6H_2O$ bildet sich leicht aus den gemischten Lösungen der beiden Salze. Das spezifische Gewicht ist 1,725, er ist isomorph mit Schönit.

Astrakanit (Blödit) $Mg(SO_4)_2Na_2.4H_2O$, monoklin, entsteht aus den gemischten Lösungen der Einzelsalze zwischen 30 und 60°. Bei Temperaturen, die wesentlich unterhalb 30° liegen, zerfällt er in ein Gemisch von Glauber- und von Bittersalz, bei Temperaturen über 71° spaltet der Astrakanit 2 Moleküle Wasser ab und bildet Löweit. $Mg(SO_4)_2Na_2.2H_2O$. Van't Hoffit $MgSO_4.3Na_2SO_4$ bildet sich aus Astrakanit und wenig Wasser bei ca. 100°.

Magnesiumsulfit $MgSO_3.6H_2O$; kristallisiert aus einer Lösung von MgO in wässeriger schwefliger Säure beim Einengen.

Magnesiumthiosulfat $MgS_2O_3.6H_2O$ entsteht aus der Lösung des vorigen durch Digerieren mit Schwefel und Eindampfen über Schwefelsäure. Rechtwinklige rhombische Prismen.

Magnesiumselenat $MgSeO_4$; kristallisiert analog dem Sulfat mit 7 oder 6 Molekülen Wasser. Auch die den Alkalimagnesiumsulfaten entsprechenden Alkalimagnesiumselenate existieren, die beiden Salzreihen sind isomorph.

Magnesiumnitrat $Mg(NO_3)_2.6H_2O$. Mit dieser Zusammensetzung kristallisiert das Salz aus seinen Lösungen bei gewöhnlicher Temperatur in rhombischen Säulen bezw. Nadeln, die an der Luft je nach deren Feuchtigkeitsgehalt verwittern oder zerfließen. Bei 90° schmilzt es in seinem Kristallwasser, verliert dabei aber schon Salpetersäure und geht in basische Produkte über, die aber erst bei Rotglut vollständig zersetzt werden.

Beim Abkühlen seiner konzentrierten Lösung auf —90° scheidet sich das Hydrat $Mg(NO_3)_2.9H_2O$ aus; der Umwandlungspunkt in Hexahydrat liegt bei —17°. Die Löslichkeit von $Mg(NO_3)_2.9H_2O$ beträgt

bei	—23°	—18°	
	15,02	13,43	Mole Wasser auf 1 $Mg(NO_3)_2$

von $Mg(NO_3)_2.6H_2O$

bei	—18°	0°	18°	40°	80°	90°	
	13,43	12,38	11,23	9,73	7,11	6,0	Mole Wasser auf 1 $Mg(NO_3)_2$

Das äquivalente Leitvermögen bei 25° ist

v	32	64	128	256	512	1024
Λ	104,6	111,0	115,7	119	122,9	125,6

Die Viskosität einer ½ normalen Lösung bezogen auf Wasser = 1 ist bei 25° 1,1706. Die Bildungswärme einer verdünnten Lösung von Magnesiumnitrat aus Magnesiumhydroxyd und Salpetersäure ist $Mg(OH)_2 + 2HNO_3\,aq = Mg(NO_3)_2\,aq + 27600$ g-cal; Lösungswärme $Mg(NO_3)_2.6H_2O + aq \rightarrow$ verdünnte Lösung —4200 g-cal.

Magnesiumnitrit $Mg(NO_2)_2 . 3H_2O$. Man vermischt die Lösungen äquimolekularer Mengen von $Ba(NO_2)_2$ und $Mg(SO_4)_2 . 7H_2O$ und engt ein. Blättrige Kristalle.

Magnesiumorthophosphat $Mg_3(PO_4)_2$. Aus der Lösung von $MgSO_4 . 7H_2O$ fällt durch Trinatriumphosphat ein flockiger Niederschlag von $Mg_3(PO_4)_2 22H_2O$ vom spezifischen Gewicht 1,640 aus. Aus sehr verdünnten Lösungen soll bei 20 bis 25° $Mg_3(PO_4)_2 . 8H_2O$ fallen.

Monohydromagnesiumsulfat $MgHPO_4 . 7H_2O$ entsteht als ein schwerlöslicher kristallinischer Niederschlag aus Magnesiumsalzlösungen und Dinatriumphosphat.

Dihydromagnesiumphosphat $Mg(H_2PO_4)_2 . 2H_2O$ entsteht durch Auflösen von Magnesia in heißer überschüssiger Phosphorsäure beim Abkühlen. In Wasser lösliche Kristalle.

Ammoniummagnesiumphosphat $MgNH_4PO_4 . 6H_2O$ entsteht als schwerlöslicher Niederschlag beim Vermischen einer chlorammoniumhaltigen, ammoniakalischen Lösung von Magnesiumsalzen mit der Lösung eines Phosphats, mikroskopische rhombische Kristalle. Die Löslichkeit des in Wasser schwerlöslichen Salzes wird durch Ammoniak noch erheblich heruntergedrückt. Um 1 Teil Salz zu lösen sind erforderlich 13500 Teile reinen Wassers oder 52400 Teile einer Lösung die aus 1 Vol Wasser und 1 Vol gesättigter NH_3-Lösung zusammengesetzt ist. Sind $K^{\cdot}$-Ionen zugegen, so kann ein entsprechendes Kaliumsalz $MgKPO_4 . 6H_2O$ ausfallen.

Magnesiumpyrophosphat $Mg_2P_2O_7$ entsteht aus $MgNH_4PO_4 . 6H_2O$ durch Glühen. Es ist glühbeständig und läßt sich unzersetzt schmelzen.

Magnesiumarsenate verhalten sich den Phosphaten sehr ähnlich, speziell gilt das für Magnesiumammoniumarsenat $NH_4MgAsO_4 . 6H_2O$, das unter ganz analogen Bedingungen entsteht wie das Magnesiumammoniumphosphat.

Magnesiumcarbonat $MgCO_3$ (Bitterspath) entsteht beim Erhitzen von Lösungen von Magnesiumsulfatlösung mit Natriumcarbonat in zugeschmolzenem Rohr. Hexagonalrhomboëdrisch. Spez. Gewicht 2,9—3,1. Durch Wasser wird das Salz hydrolysiert Es fallen deshalb beim Versetzen von Magnesiumsalzen mit Carbonatlösungen in offenem Gefäß basische Niederschläge unbestimmter Zusammensetzung. Beim Erhitzen an der Luft auf 200° dissoziiert $MgCO_3$ bereits vollständig. Es löst sich in reinem Wasser etwas auf (0,0095 Mole/L bei 15°) und scheidet sich aus dieser Lösung unterhalb 16° als Pentahydrat, oberhalb Zimmertemperatur als Trihydrat ab.

Magnesia alba ist der Niederschlag, den man aus Chlormagnesiumlösungen durch Fällen mit Soda erhält. Es besitzt die durchschnittliche Zusammensetzung $3MgCO_3 . Mg(OH)_2 . 3H_2O$, ist aber wohl kaum als chemisches Individuum anzusehen.

Magnesiumhydrocarbonat $Mg(CO_3H)_2$ ist in den Lösungen von $MgCO_3$ in kohlensäurehaltigem Wasser anzunehmen. Die Löslichkeit des Carbonats in Wasser wird nämlich durch Kohlensäure außerordentlich erhöht. Die Löslichkeit ist bei einem Druck der CO in Atmosphären von

0,5	1	2	4	
0,255	0,325	0,461	0,518	gr. Mole $MgCO_3$ im Liter

Kaliummagnesiumcarbonat $\{Mg(CO_3)_2\}K_2 . 4H_2O$ ist als das Kaliumsalz der vorhergehenden Säure anzusehen. Man erhält es durch Digerieren von Kaliumbicarbonatlösungen mit $MgCO_3 . 3H_2O$ bei 60 bis 70° als rhombische Prismen. Durch Wasser wird es leicht zersetzt unter Abscheidung von Magnesia alba. Das primäre Salz ist das Kaliumhydromagnesiumcarbonat $\{Mg(CO_3)_2\}KH . 4H_2O$, welches sich bildet, wenn Kohlensäure in ein Gemisch von Chlorkaliumlösung und Magnesiumcarbonat eingeleitet wird. Es scheidet sich als schwerlöslicher kristallinischer Niederschlag ab. Beim Glühen zerfällt dieses Salz in Kaliumcarbonat und Magnesiumoxyd, welch ersteres durch Wasser leicht ausgezogen werden kann. Da somit bei diesem Prozeß Chlorkalium in Pottasche verwandelt wird, hat man in ihm eine rationelle Methode zur Herstellung dieser Substanz.

Ammoniummagnesiumcarbonat $\{Mg(CO_3)_2\}(NH_4)_2 . 4H_2O$ fällt aus ammoniakalischen Lösungen von Magnesiumsalzen nach dem Versetzen mit Ammoncarbonat in ungefähr 24 Stunden aus. Es ist früher gelegentlich zur Trennung des Magnesiums von den Alkalien benutzt worden, da aber bei Gegenwart von Kali dieses infolge Bildung von $\{MgCO_3)_2\}K_2 . 4H_2O$ mitfallen kann, ist die Methode unrationell.

$\{Mg(CO_3)_2\}Na_2$ läßt sich in Form kleiner quadratischer Kristalle durch Digerieren von $MgCO_3 . 3H_2O$ mit $NaHCO_3$ erhalten. Als das diesen Alkaliverbindungen analoge Calciumsalz ist der Dolomit $Mg\{CO_3)_2\}Ca$ anzusehen.

Magnesiumacetat $Mg(CH_3COO)_2 . 4H_2O$; aus einer Lösung von MgO in Essigsäure beim Eindampfen in monoklinen Kristallen. Die Lösung vermag reichliche Mengen $Mg(OH)_2$ aufzulösen, ohne daß ein definiertes basisches Salz gebildet wird.

Magnesiumoxalat $MgC_2O_4 . 2H_2O$; fällt aus Magnesiumsalzlösungen durch lösliche Oxalate. Bildet leicht übersättigte Lösungen. Durch Absättigen von Oxalsäurelösungen mit $Mg(OH)_2$ können leicht ziemlich stabile Lösungen mit 40facher Uebersättigung erhalten werden. Die Löslichkeit in Wasser

ist 300 mg MgC_2O_4 = 2,7 Millimol. In Säuren, die stärker als Oxalsäure dissoziieren, ist MgC_2O_4 leicht löslich. Bemerkenswert ist die abnorme Abnahme der äquivalenten Leitfähigkeit mit steigender Konzentration der Lösung. Bei 18° hat man

v	4,78	12,0	29,9	74,7	187	467
Λ	9,89	13,54	18,88	26,6	37,17	50,6

Magnesiumtartrat $Mg(C_4H_4O_6).4H_2O$ aus konzentierten Mg-Lösungen durch Zusatz von Alkalitartart. Das Salz löst sich in 124 Teilen Wasser. Das saure Tartrat $Mg(C_4H_4O_6)_2$ entsteht aus Magnesiumoxyd und Weinsäure. 1 Teil löst sich in 53 Teilen Wasser.

Magnesiumborat $MgB_6O_{10}.7H_2O$ entsteht aus MgO und freier Borsäure und Konzentrieren der Lösung. Versetzt man eine Lösung von Mg-Salz mit Borat, so erhält man Metaborat $MgB_2O_4.8H_2O$ in amorpher Form. Setzt man diese Verbindung der Einwirkung schwach wasserentziehender Mittel z. B. Chlormagnesiumlösung aus, so geht sie in den kristallisierten Pinnoit $Mg(B_2O_2)_2.3H_2O$ über.

Magnesium legiert sich leicht mit den meisten Metallen. Zur Herstellung der Legierungen trägt man das betr. Metall in Magnesium ein, das unter einer Schutzhülle von Flußspat niedergeschmolzen ist. Bekanntere Legierungen sind: das Magnalium: Aluminium mit 10 bis 25% Magnesium. Spezifisches Gewicht 2 bis 2,5; leichter und härter als Aluminium. Magnesium-Amalgam kann als Reduktionsmittel benutzt werden. Magnesiumkalium, Magnesiumnatrium werden durch Zusammenschmelzen der Metalle im Wasserstoffstrom erhalten. Sie zersetzen Wasser.

Die meisten Metalle werden durch geringen Magnesiumzusatz sehr spröde, so daß ihre Legierungen damit kaum technisches Interesse besitzen.

6. Photochemie. Das Bogenspektrum des Magnesiums zeigt folgende Linien: 518,4; 517,3; 383,8; 383,2; 383,0; 293,7; 292,9; 285,2; 280,1; 279,8; 279,6; 279,1.

Literatur. ***Gmelin-Kraut***, *Handbuch der anorganischen Chemie, Bd. II, 2. Heidelberg 1909.* — ***Abbeggs*** *Handbuch der anorganischen Chemie, Bd. II, 2. Leipzig 1905.* — ***Dammer***, *Handbuch der anorgnischen Chemie, Bd. II, 2 u. IV. Stuttgart 1902.* — ***Naumann-Zirkel***, *Mineralogie. Leipzig 1901.*

O. Hauser.

c) Calcium.

Ca. Atomgewicht 40,07.

1. Atomgewicht. Vorkommen. Geschichte. 2. Darstellung und Verwendung. 3. Physikalische Eigenschaften des metallischen Calciums. 4. Elektrochemie. 5. Analytische Chemie. 6. Spezielle Chemie: a) Chemische Eigenschaften des metallischen Calciums. b) Verbindungen des Calciums: α) Calciumlegierungen. β) Verbindungen des Calciums mit Nichtmetallen. γ) Salze des Calciums mit Sauerstoffsäuren. 7. Thermochemie. 8. Photochemie. Kolloidchemie siehe Barium.

1. Atomgewicht. Vorkommen. Geschichte. Die internationale Atomgewichtskommission gibt für 1912 den Wert Ca = 40,07.

Spektralanalytisch ist Ca auf der Sonne nachgewiesen. Das freie Element kommt auf der Erde nicht vor. In Form seiner Verbindungen ist es sehr verbreitet. Es macht etwa 3,51% der uns bekannten Masse der Erdkörpers aus. Die wichtigsten der in der Natur vorkommenden Calciumverbindungen sind: Carbonat (Kalkspat, Kalkstein, Marmor, Kreide, Aragonit; zusammen mit Magnesiumcarbonat Dolomit), Sulfat (Gips, Anhydrit), Fluorid (Flußspat), Phosphat (Phosphorit, Apatit). Außerdem enthalten zahlreiche Silikate Calcium.

Kalk und Gips waren als Mörtel schon im Altertum in Gebrauch. Im 18. Jahrhundert lernte man die Kalkerde von anderen Erden unterscheiden. 1808 stellte Davy zuerst metallisches Calcium dar.

2. Darstellung und Verwendung des metallischen Calciums. Metallisches Calcium wird gewonnen durch Reduktion von CaO, $Ca(OH)_2$ oder Calciumhalogeniden entweder mit Hilfe anderer Metalle (Na, Mg) oder, und dies sind die in erster Linie wichtigen Methoden, elektrolytisch. Davy erhielt Ca-Amalgam durch Elektrolyse von $Ca(OH)_2$ an einer Quecksilberkathode, aus dem Amalgam wurde durch Abdestillieren des Hg im Wasserstoffstrom Ca erhalten. Geschmolzene Ca-Halogenide sind vielfach zur Ca-Gewinnung elektrolysiert worden. In neuerer Zeit nimmt man meist $CaCl_2$, eventuell wegen des niedrigeren Schmelzpunktes mit einem Zusatz von CaF_2. Calcium wird jetzt technisch dargestellt (in Bitterfeld). Man elektrolysiert geschmolzenes $CaCl_2$ mit einer Eisenkathode, die allmählich höher geschraubt wird, so daß die Elektrode immer nur ganz wenig eintaucht. Es entsteht eine Ca-Stange.

Ca wird im Laboratorium verwandt zu Reduktionen z. B. von Oxyden seltener Metalle, von organischen Stoffen, dann zum Trocknen von Alkoholen, zur Reinigung von Edelgasen, zur Herstellung eines hohen Vakuums in Entladungsröhren. In der Technik wird es zurzeit kaum verwandt, vorgeschlagen wurden: Herstellung von CaH_2, das mit H_2O H_2 entwickelt für die Verwendung bei der Luftschiffahrt; Zusatz zu Metallen für Gußzwecke, um blasenfreie Güsse zu erzielen; Herstellung von Legierungen von niedrigem spezifischen Gewicht.

3. Physikalische Eigenschaften des

metallischen Calciums. Calcium ist bisher nur in einer Modifikation (hexogonal oder rhombisch) bekannt. Es ist silberweiß, läuft aber an der Luft bald gelb an (Nitridbildung). Es läßt sich mit dem Messer schneiden. Spezifisches Gewicht ganz rein 1,50, das gewöhnliche noch etwas verunreinigte Metall hat 1,54. Kompressibilität: mittlere Volumänderung durch 0,987 Atm. zwischen 98,7 und $5 \times 98,7$ Atm. $5,5 . 10^{-6}$. Spezifische Wärme zwischen 0° und 20,3° 0,145, zwischen 0° und 100° 0,149, zwischen — 185° und + 20°, 0,1574. Schmelzpunkt 800°. Bei 700° fängt Calcium an im Vakuum zu verdampfen. Elektrische Leitfähigkeit bei 20° das 15,6 fache der vom Ag.

4. **Elektrochemie.** Die Normalvalenz des Ca ist positiv und gleich 2. Verbindungstypen: CaH_2, $CaCl_2$, CaO, $CaSO_4$. Von einwertigen Ca-Verbindungen sind bekannt: CaCl, CaJ, CaF und Ca_2O. Die Neigung Nebenvalenzen zu betätigen ist gering aber sicher vorhanden (Doppelsalze, Hydrate, Ammoniakate). Nur ein Calciumion ist bekannt. Es ist farblos. Die Ionisierungswärme beträgt 109500 g-cal. Das elektrochemische Potential ist einer unmittelbaren Messung nicht zugänglich. Das Normalpotential wird auf Grund thermochemischer Daten geschätzt zu $\varepsilon_h = -2,5$ Volt. Ca ist edler als Na und K. Bei 800° macht aber Ca aus NaCl Na frei, ist also dann unedler als Na.

Die Beweglichkeit des Ca-Ions ist 51 bei 18°, Temperaturkoeffizient der Beweglichkeit 0,0247.

Wohlcharakterisierte komplexe Ionen des Ca sind nicht bekannt, doch ist Komplexbildung anzunehmen aus CaF_2 und H_2F_2, Ca-Oxalat und $MgCl_2$, Ca-Oxalat und $CaCl_2$.

5. **Analytische Chemie.** Zum qualitativen Nachweis des Ca auf trockenem Wege dient die ziegelrote Flammenfärbung (Spektrum vgl. Photochemie). Von den schwerlöslichen Ca-Salzen: Fluorid, neutrales Phosphat und Arsenat, Silikat, Carbonat und Oxalat, werden für die analytische Fällung die beiden letztgenannten verwandt. $CaCO_3$ fällt nur in neutraler oder alkalischer Lösung, CaC_2O_4 auch in essigsaurer, beide nicht in stark saurer Lösung. Die Fällung von $CaCO_3$ ist unvollständig oder bleibt bei kleinen Mengen ganz aus, wenn viel NH_4-Salze zugegen sind. Die Oxalat-Fällung ist stets, auch in essigsaurer Lösung, praktisch vollständig und dient daher zur quantitativen Abscheidung des Ca. Gewogen wird als CaO nach heftigem Glühen, als $CaCO_3$ nach gelindem Glühen und Behandeln mit $(NH_4)_2CO_3$, als $CaSO_4$ nach Behandeln mit H_2SO_4. Titrimetrisch mit Permanganat kann man Ca bestimmen durch Ausfällen als Oxalat und Titration des überschüssig zugegebenen Oxalates oder der aus dem gefällten Ca-Oxalat in Freiheit gesetzten Oxalsäure. Elektrolytisch kann man Calcium an Quecksilber abscheiden, und dann das bei der Zersetzung des gebildeten Amalgams erhaltene $Ca(OH)_2$ titrieren.

Die Trennung des Calciums von den Schwermetallen erfolgt durch deren Ausfällen mit H_2S oder (CO_2-freiem) $(NH_4)_2S$, die Trennung von Mg durch doppelte Fällung als Oxalat (unter bestimmten Bedingungen genügt einfache Fällung). Trennung von Ca Sr Ba untereinander siehe bei Ba. Die Trennung des Calciums von den Alkalien erfolgt durch Fällung als Oxalat.

6. **Spezielle Chemie.** 6a) Chemische Eigenschaften des metallischen Calciums. Metallisches Calcium ist ein sehr reaktionsfähiger Stoff. Von trockener Luft wird es allerdings bei gewöhnlicher Temperatur kaum angegriffen, beim Erhitzen verbrennt es aber darin unter Bildung von Oxyd und Nitrid. Überhaupt reagiert es mit allen bekannten Gasen mit Ausnahme der Edelgase bei hoher Temperatur unter Bildung entsprechender Verbindungen, z. B. mit H_2 (CaH_2), den Halogenen, HCl, H_2S, NO_2, CO_2(CaO und CaC_2), NH_3 (bei höherer Temperatur CaH_2 und N_2, bei 0° Calciumammonium $Ca(NH_3)_4$), mit Kohlenwasserstoffen (C, CaC_2 und CaH_2). Ca vereinigt sich bei höherer Temperatur mit S, Se, P, As, Sb, C.

Mit H_2O setzt sich Ca nur langsam unter H_2-Entwickelung um, dagegen lebhaft mit verdünnten Säuren. Mit Alkoholen reagiert es nur langsam. Oxyde werden durch Ca bei höherer Temperatur reduziert, z. B. SO_2, P_2O_5, SiO_2, auch konzentrierte H_2SO_4, die dabei SO_2 und H_2S liefert. Ca reagiert mit Anilin und anderen aromatischen Aminen unter Anilid- usw. Bildung. Mit Acetessigester entsteht Ca-Acetessigester, ebenso mit Malonester Ca-Malonsäureester.

6b) Verbindungen des Calciums. *α*) Calciumlegierungen. Nachgewiesen ist die Existenz folgender Ca-Legierungen: $CaZn_{10}$, $CaZn_4$, Ca_2Zn_3, Ca_4Zn, $CaCd_2$, CaCd, Ca_3Cd_2(?), $CaAl_3$, $CaTl_3$, CaTl, $CaPb_3$, $CaSn_3$. Diese Legierungen bilden sich beim Zusammenschmelzen der Komponenten.

β) Verbindungen des Calciums mit Nichtmetallen: Calciumhydrid, CaH_2, wird erhalten durch Einwirkung von H_2 auf metallisches Ca bei Dunkelrotglut. Es ist weiß, krystallinisch, ohne metallischen Charakter. Es setzt sich mit Wasser und Säuren unter H_2-Entwickelung um, mit CO_2 bildet es Calciumformiat, mit N_2 reagiert es umkehrbar unter Bildung von Ca_3N_2 und H_2.

Calciumfluorid, CaF_2, findet sich als Flußspat (verbreitetste Fluorverbindung) vielfach schön kristallisiert in Würfeln oder Oktaedern. Dichte 3,18. Flußspat phospho-

resziert nach gelindem Erwärmen. Er ist sehr durchlässig für ultraviolettes Licht, auch ultrarote Strahlen werden durchgelassen. Brechungsexponent $n_D = 1,4339$.

Durch Fällung eines Ca-Salzes mit einem Fluorid entsteht meist gallertartiges CaF_2. CaF_2 bildet haltbare kolloidale Lösungen. Kristallinisches CaF_2 erhält man durch Umsetzung von $CaCO_3$ mit HF oder auch aus NaF und $CaCl_2$ im Schmelzfluß.

CaF_2 schmilzt bei 1330°. Durch H_2O wird es bei Rotglut zersetzt. In Wasser ist CaF_2 sehr schwer löslich, bei 18° 16,3 mg im Liter. Durch Flußsäure wird die Löslichkeit erhöht (Komplexbildung), $CaF_2.2HF.6H_2O$ ist im festen Zustand dargestellt.

Durch konzentrierte H_2SO_4 wird CaF_2 zersetzt unter Bildung von HF (Darstellungsmethode für HF).

Calciumchlorid, $CaCl_2$. $CaCl_2$ kommt mit $MgCl_2$ vor als Tachyhydrit($2MgCl_2.CaCl_2.12H_2O$), seine Ionen finden sich im Meerwasser und vielen Mineralquellen. Dargestellt wird es durch Einwirkung von HCl auf CaO oder $CaCO_3$.

$CaCl_2$ kristallisiert mit 6, 4, 2, 1, 0 Molekülen H_2O. $CaCl_2.6H_2O$ entsteht beim Eindunsten der gesättigten Lösung, hexagonal. $CaCl_2.4H_2O$ ist dimorph. α-(rhombisch) und β-Form. β ist gegenüber α immer unbeständig. Von $CaCl_2.2H_2O$ und $CaCl_2.H_2O$ sind die Kristallformen unbekannt.

Das System $CaCl_2$—H_2O ist vom Standpunkt der Phasenlehre (siehe dort) aus eingehend untersucht. Da zwei Bestandtteile vorhanden sind, können maximal 4 Phasen nebeneinander existieren. Wenn flüssige und gasförmige Phase (Lösung und Dampf) vorhanden sind, so können immer nur zwei feste Phasen miteinander im Gleichgewicht sein. Dies ist der Fall an bestimmten Punkten, an denen das System keine Freiheit mehr besitzt, Druck und Temperatur müssen dort immer einen ganz bestimmten Wert haben. Ihre Lage ist folgende:

Art der Phasen.

fest	fest	flüssig	gasförmig	Temperatur	Druck
Eis	$CaCl_2.6H_2O$	Lösung	Dampf	— 55°	0 mm Hg
$CaCl_2.6H_2O$	$CaCl_2.4H_2O\alpha$	,,	,,	+ 29,4°	6,80 ,, ,,
$CaCl_2.6H_2O$	$CaCl_2.4H_2O\beta$	,,	,,	+ 29,2°	5,67 ,, ,,
$CaCl_2.4H_2O\beta$	$CaCl_2.2H_2O$	,,	,,	+ 38,4°	7,88 ,, ,,
$CaCl_2.4H_2O\alpha$	$CaCl_2.2H_2O$	,,	,,	+ 45,3°	11,77 ,, ,,
$CaCl_2.2H_2O$	$CaCl_2.H_2O$	,,	,,	+ 175,5°	842 ,, ,,
$CaCl_2.H_2O$	$CaCl_2$	,,	,,	ca. 260°	mehrere Atmos.

Diese Punkte sind in der graphischen Darstellung (Koordinaten: Temperatur und Zusammensetzung der Lösung) durch Kurven verbunden, auf denen die betreffende feste Phase mit der Lösung im Gleichgewicht steht: Löslichkeitskurven. Beim Uebergang aus einer Kurve in die andere an einem jener vierfachen Punkte, findet eine vollständige Umwandlung der einen festen Phase in die andere statt, es sind Umwandlungspunkte.

Wasserfreies $CaCl_2$ entsteht aus den verschiedenen Hydraten durch starkes Erhitzen (über 260°). Es schmilzt bei 802°. Dichte 2,26. Beim Schmelzen tritt durch den Wasserdampf der Luft geringe hydrolytische Spaltung ein unter Bildung von CaO. Wasserfreies $CaCl_2$ bindet sehr energisch Wasser. Es dient daher als Trockenmittel für Gase und Flüssigkeiten, natürlich nur für solche Stoffe, mit denen es nicht reagiert. Für NH_3 ist es nicht verwendbar, es bildet damit die Verbindungen $CaCl_2$ mit 8, 4 und 2 NH_3. $CaCl_2$ trocknet nicht so weitgehend wie H_2SO_4 oder P_2O_5. Daher können mit diesen Stoffen getrocknete Gase aus nicht absolut wasserfreiem $CaCl_2$ wieder H_2O aufnehmen. Wasserfreies $CaCl_2$ löst sich in H_2O unter Wärmeentwickelung, $CaCl_2.6H_2O$ unter Wärmeaufnahme. Deswegen und wegen der tiefen Lage des kryohydratischen Punktes, an dem Eis und Hexahydrat nebeneinander bestehen können (— 55°), ist dieses sehr geeignet für Kältemischungen.

$CaCl_2$ ist in Wasser sehr leicht löslich, 100 g H_2O lösen bei 20° 74 g $CaCl_2$.

Die physikalischen Eigenschaften der wässrigen $CaCl_2$ - Lösungen sind sehr ausführlich untersucht (vgl. Abegg, Handbuch 2, 2).

Wässrige $CaCl_2$-Lösungen geben bei der Elektrolyse an der Anode Calciumhypochlorid und Chlorat, letzteres namentlich in konzentrierteren Lösungen bei höherer Temperatur und der Gegenwart von Sauerstoffüberträgern ($H_2Cr_2O_7$).

$CaCl_2$ ist in einigen Alkoholen (Aethyl-, Propyl-, Amylalkohol) löslich. Diese Lösungen besitzen elektrische Leitfähigkeit. $CaCl_2$ ist also darin elektrolytisch dissoziiert. Additionsverbindungen von $CaCl_2$ mit Alkoholen und anderen organischen Stoffen sind

im festen Zustand dargestellt wurden z. B. $CaCl_2.3CH_3OH$, $CaCl_2.3C_2H_5OH$.

Calciumoxychlorid ist im wasserfreien und wasserhaltigen Zustand bekannt. Die Zusammensetzung wird verschieden angegeben.

Calciumchlorür, Calciumsubchlorid, CaCl, entsteht neben Ca bei der Elektrolyse von geschmolzenem $CaCl_2$ an der Kathode, in Form von roten bis violetten Kristallen. Man kann es auch erhalten durch Erhitzen von $CaCl_2$ mit Ca auf 1000° und schnelles Abkühlen; beim langsamen Abkühlen spaltet es sich in die Komponenten. Auf analogem Wege wurde auch Calciumsubjodid, CaJ, und -subfluorid, CaF, erhalten.

Calciumbromid, $CaBr_2$, kann erhalten werden aus $Ca(OH)_2$, Br und S oder P als Reduktionsmittel, und natürlich aus $Ca(OH)_2$ oder $CaCO_3$ und HBr. $CaBr_2$ schmilzt bei 760° und siedet bei 806 bis 812°. Dichte 3,32. Es ist sehr hygroskopisch. Von Hydraten ist eins mit $4H_2O$ und eins mit $6H_2O$ bekannt. $CaBr_2$ ist in Wasser sehr leicht löslich. Die gesättigte Lösung enthält bei 20° in 100 g 57,1 g $CaBr_2$.

Calciumjodid, CaJ_2 wird dargestellt aus $Ca(OH)_2$ und HJ oder J und einem Reduktionsmittel (P, Fe).

CaJ_2 schmilzt bei 740°, d $^{25}_{4}$ 3,956. Es zerfließt an der Luft und bildet dann $CaJ_2.6H_2O$. Außerdem sind Hydrate mit 4 und $7H_2O$ beobachtet. In Wasser ist CaJ_2 leicht löslich. 100 g der bei 19° gesättigten Lösung enthalten 66,3 g CaJ_2. In Aethylalkohol ist CaJ_2 leicht löslich. CaJ_2 addiert J und bildet ein Perjodid. Calciumtetrajodid, CaJ_4. Es wird im reinen Zustand durch Zusammengeben der Komponenten als schwarze kristallinische Masse erhalten. In wässriger Lösung ist seine Existenz nachgewiesen durch Gefrierpunktsmessungen.

Calciumoxyd, gebrannter Kalk, CaO, bildet sich beim Verbrennen von Ca im Sauerstoff und beim Glühen vieler Ca-Salze, z. B. Nitrat, Carbonat, Oxalat. Es wird meist aus dem Carbonat dargestellt (technisch sehr wichtig).

Die Bildung von CaO und CO_2 aus $CaCO_3$ ist ein umkehrbarer Vorgang. Verhindert man durch Arbeiten im geschlossenen Raum, daß CO_2 fortgeht, so kommt es zu einem Gleichgewicht. Das System enthält 2 Bestandteile, bei 3 Phasen (2 feste: $CaCO_3$, CaO und die gasförmige CO_2) kann es nach der Phasenregel (siehe dort) nur eine Freiheit besitzen. Zu jeder beliebig gewählten Temperatur gehört ein ganz bestimmter Druck des CO_2. Es wurde gefunden

für t =	700	750	800	850	900°
„ p =	50	99	195	370	700 mm

Kann CO_2 ungehindert entweichen, so kann sich das Gleichgewicht nicht ausbilden, die Reaktion ist vollständig. Um jedoch eine schnelle Umsetzung zu erzielen ist es vorteilhaft, die Temperatur so hoch zu steigern, daß der Druck des CO_2 Atmosphärendruck übersteigt; diese Temperatur (908° ± 5°) entspricht ganz dem Siedepunkt einer Flüssigkeit. Unterhalb dieser Temperatur findet gewissermaßen nur ein mehr oder weniger langsames Abdunsten des CO_2 statt.

Durch Brennen dargestelltes CaO ist weiß, amorph. d 3,3. CaO schmilzt erst bei sehr hohen Temperaturen, unter Atmosphärendruck bei 1990 bis 1995°. Unter vermindertem Druck war es nicht zum Schmelzen zu bringen. Bei diesen hohen Temperaturen verdampft CaO relativ schnell, es kondensiert sich in Form feiner Nadeln. Geschmolzener Kalk erstarrt kristallinisch (regulär). Er reagiert weniger lebhaft als der amorphe.

In der Knallgasflamme strahlt CaO ein sehr intensives Licht aus (Drummondsches Kalklicht).

CaO reagiert bei hoher Temperatur mit C unter Carbidbildung (siehe Calciumcarbid). Bei Abwesenheit von Wasser besitzt CaO in der Kälte kein großes Reaktionsvermögen, z. B. reagiert es nicht mit Cl, CO_2, SO_2, auch nur langsam mit HCl.

Mit Wasser liefert CaO Calciumhydroxyd, $Ca(OH)_2$ gelöschter Kalk, unter lebhafter Wärmeentwickelung. Die Geschwindigkeit des Vorganges ist stark abhängig von Verunreinigungen, sie wird besonders durch SiO_2 verzögert. Beim Erhitzen gibt $Ca(OH)_2$ das Wasser wieder ab, p_{H_2O} wird bei 547° = 760 mm.

$Ca(OH)_2$ ist ein weißes staubiges Pulver. d 2,08. Ein Hydrat $Ca(OH)_2$, H_2O ist bekannt.

$Ca(OH)_2$ ist hygroskopisch. Es löst sich nur wenig in Wasser (Kalkwasser). 1 g CaO braucht bei 20° 868,7 g H_2O. Die Löslichkeit wird vermindert durch NaOH oder KOH entsprechend der Zurückdrängung der elektrolytischen Dissoziation. In den Lösungen mancher Salze z. B. $CaCl_2$, NH_4Cl, NaCl ist die Löslichkeit erhöht, ebenso sehr beträchtlich in Lösungen von Glycerin und Rohrzucker, $Ca(OH)_2$ wird dabei chemisch gebunden.

$Ca(OH)_2$ ist eine starke Base, in $^1/_{64}$ n-Lösung ist es bei 25° zu 90% dissoziiert. Es findet als solche wegen seiner Billigkeit in der Technik vielfache Verwendung. Sehr wichtig ist die Verwendung des gelöschten Kalkes mit Sand und Wasser gemischt als Mörtel. Das Erhärten erfolgt nach Abgabe des größten Teils des zugesetzten Wassers (Abbinden), durch Aufnahme von CO_2 aus der Luft und Bildung von $CaCO_3$.

Calciumsuperoxyd, CaO_2, wird erhalten durch Fällen von Kalkwasser mit H_2O_2 oder Na_2O_2. Es entsteht $CaO_2 . 8H_2O$, das bei 130° CaO_2 liefert. Es zersetzt sich bei Rotglut in CaO und O_2.

Durch die Einwirkung von Mg auf CaO soll Calciumsuboxyd, Ca_2O, entstehen.

Calciumsulfid, CaS, kann gewonnen werden durch Glühen von CaO mit S oder CS_2 oder durch Reduktion von $CaSO_4$ z. B. mit H_2 oder Kohle. CaS ist in reinem Zustand weiß. Mit bestimmten Stoffen etwas verunreinigte Präparate zeigen lebhafte Phosphoreszenz. CaS ist in Wasser nur wenig löslich. In der Lösung ist es hydrolysiert nach der Gleichung $CaS + 2H_2O = Ca(SH)_2 + Ca(OH)_2$. An der Luft oxydiert sich das aus $CaSO_4$ gewonnene CaS schnell.

Calciumhydrosulfid, $Ca(SH)_2$, entsteht durch Einleiten von H_2S in Kalkwasser oder Kalkbrei. $Ca(SH)_2$ kristallisiert in Prismen mit $6H_2O$. In Wasser und Alkohol ist es leicht löslich. Beim Erwärmen gibt $Ca(SH)_2$, $6H_2O$ erst das Kristallwasser und dann H_2S ab und bildet CaS. Die wässrige Lösung erleidet beim Kochen hydrolytische Spaltung.

Calciumpolysulfide entstehen beim Kochen von CaS mit H_2O und S. Im festen Zustand sind dargestellt worden CaS_4 und CaS_5.

Calciumnitrid, Ca_3N_2, entsteht aus Ca und N_2 beim Erhitzen. Hellbraune Kristalle. Fp. 1200°. d 2,6. Ca_3N_2 wird durch H_2 reduziert zu NH_3 und CaH_2, Cl und Br greifen es bei gewöhnlicher Temperatur an. An der Luft verbrennt es. Mit Wasser bildet es NH_3 und $Ca(OH)_2$, mit verdünnten Säuren ein Gemisch von Ca- und NH_4-Salzen, konzentrierte Säuren wirken nicht ein.

Ca_3N_2 bildet beim Erhitzen im H_2-Strom auf etwa 700° eine gelbe Verbindung Tricalciumamid, $Ca_3(NH_2)_2$. Diese zerfällt im Sonnenlicht in Calciumimid CaNH und CaH_2.

Calciumammonium, $Ca(NH_3)_4$, entsteht aus Ca und NH_3 bei 0° unter Wärmeentwicklung. Es entzündet sich an der Luft. Bei Zimmertemperatur geht es über in Calciumamid, $Ca(NH_3)_2$.

In flüssigem NH_3 löst sich Ca unter Bildung einer Verbindung $Ca(NH_3)_6$. Lösung und Verbindung besitzen metallisches Leitvermögen. Beim Abdunsten des NH_3 bildet sich metallisches Ca zurück.

Calciumphosphid, Ca_3P_2, wird erhalten aus CaO und P bei Glühtemperatur, in reinem kristallisierten Zustand durch Reduktion von Calciumanhydrophosphat mit Al oder mit Kohle im elektrischen Ofen, ferner durch Einwirkung von P-Dampf auf metallisches Ca.

Ca_3P_2 ist rotbraun, schwer schmelzbar, verbrennt bei 300° an der Luft, wird von Wasser unter Bildung von Phosphorwasserstoffen darunter P_2H_4, daher sind die Gase selbstentzündlich, zersetzt.

Calciumarsenid, Ca_3As_2.

Calciumcarbid, CaO_2, wird dargestellt durch Erhitzen von Kalk und Kohle auf hohe Temperatur am besten im elektrischen Ofen. $CaO + 3C = CaC_2 + CO$. Der Vorgang ist umkehrbar, bei etwa 1620° erreicht der Partialdruck des CO Atmosphärendruck. Praktisch erfolgt daher die Carbidbildung erst oberhalb dieser Temperatur.

CaC_2 ist kristallinisch, in reinem Zustand farblos, d 2,2, unlöslich in den gebräuchlichen Lösungsmitteln. Mit Wasser liefert es unter Wärmeentwickelung Acetylen, $CaC_2 + 2H_2O = C_2H_2 + Ca(OH)_2$ (technisch von großer Bedeutung). CaC_2 ist eine endotherme Verbindung.

Mit N_2 reagiert CaC_2 bei Rotglut unter Bildung von Calciumcyanamid, $CaCN_2$, Kalkstickstoff. Die Gegenwart von $CaCl_2$ beschleunigt den Vorgang. $CaCN_2$ wird als Stickstoffdünger verwandt.

Calciumsilicide: $CaSi_2$, Ca_3Si_2, CaSi, Calciumborid CaB_6.

γ) Salze des Calciums mit Sauerstoffsäuren. Salze der Halogensauerstoffsäuren.

Calciumhypochlorit, $Ca(ClO)_2$, kann in reiner Form durch Gefrierenlassen einer Chlorkalklösung und Auftauen des erhaltenen Kryohydrats gewonnen werden, aus konzentrierten Chlorkalklösungen (siehe weiter unten) auch durch direkte Kristallisation oder durch Aussalzen mit NaCl. Es kristallisiert mit $4H_2O$.

Ein Calciumsalz der unterchlorigen Säure ist der wirksame Bestandteil des Chlorkalks. Chlorkalk wird gewonnen durch Ueberleiten von Chlor über feuchten gelöschten Kalk. Die einfachste Reaktionsgleichung wäre

$$2Ca(OH)_2 + 2Cl_2 = Ca(OCl)_2 + CaCl_2 + 2H_2O.$$

Jedoch erreicht in der Praxis wenigstens die Menge des aufgenommenen Chlors niemals den der Gleichung entsprechenden Wert und zweitens zeigt Chlorkalk nicht die Eigenschaften eines Gemenges von $Ca(OCl)_2$ und $CaCl_2$. Die Frage nach der Konstitution des Chlorkalks ist trotz vielfacher Bemühungen noch nicht vollständig gelöst. Am zweckmäßigsten scheint es zurzeit, ihn als ein gemischtes Salz der unterchlorigen Säure und der Salzsäure aufzufassen $Ca{<}^{Cl}_{OCl}$ oder $(Ca(OCl)_2 . CaCl_2)$. Vielleicht besteht Chlorkalk auch aus einem Gemenge verschiedenartiger Verbindungen.

Der Wert des Chlorkalks entspricht seinem Gehalt an wirksamem Chlor d. h. der Chlormenge, die man aus ihm durch Behandeln mit verdünnten Säuren (Salzsäure) entwickeln kann. Es wird bei frischem

Material fast quantitativ dieselbe Chlormenge frei, die von dem $Ca(OH)_2$ absorbiert worden war. $Ca^{Cl}_{ClO} + 2HCl = CaCl_2 + H_2O + Cl_2$. Der Gehalt des gewöhnlichen Chlorkalks an wirksamem Chlor beträgt etwa 36%.

Beim längeren Einleiten von Chlor in Kalkmilch fallen wenig lösliche Verbindungen von der allgemeinen Formel: $Ca(OCl)_2 . xCa(OH)_2$ aus, z. B. $Ca(OCl)_2 . 2Ca(OH)_2$, $Ca(OCl)_2 . 4Ca(OH)_2$. Bei weiterer Behandlung mit Cl_2 gehen sie wieder in Lösung unter Chlorierung des abgespaltenen $Ca(OH)_2$. Durch Zugabe von CaO zu einer chlorierten Kalkmilch und weiterer Chlorierung kann man Chlorkalklösungen so hoher Konzentration erhalten, daß direkt oder auf Zusatz von NaCl $Ca(OCl)_2$ ausfällt.

Chlorkalk ist ein weißes, etwas hygroskopisches Pulver, das an der Luft schwach nach Chlormonoxyd (Cl_2O) und Cl_2 riecht. Beim Liegen an der Luft verliert er an Wirksamkeit, Cl_2 und Cl_2O entweicht und es bildet sich Chlorat. Beim Erwärmen verliert er erst Cl_2 bis 70°, dann auch Cl_2O und O_2. Bei 190° geht alles wirksame Chlor fort.

Um aus Chlorkalk Chlor darzustellen, gibt man meist verdünnte Salzsäure zu. Jedoch ist auch das Kohlendioxyd der Luft imstande, vollständig, wenn auch langsamer, alles wirksame Chlor zu verdrängen. Auf der leichten Darstellbarkeit von Chlor aus Chlorkalk, (die Reaktion geht schon bei gewöhnlicher Temperatur vor sich) beruht seine Verwendung zum Bleichen (Bleichkalk), für andere Oxydationszwecke, zur Chlor-Entwickelung und zur Desinfektion.

Chlorkalk löst sich in wenig Wasser nicht vollständig auf, es bleibt immer ein Rückstand von $Ca(OH)_2$, basischem Chlorcalcium und auch von solchen Verbindungen aus $Ca(OH)_2$ und $Ca(OCl)_2$, wie sie oben erwähnt wurden.

Die Lösungen zeigen die Reaktionen des Anions der unterchlorigen Säure ClO'. Bei höherer Temperatur bildet sich in den Lösungen Chlorat, neben O_2. Bei Zugabe eines Kobaltsalzes tritt lebhafte O_2-Entwickelung ein, das gebildete Kobaltihydroxyd bzw. Kobaltsuperoxyd wirkt als Katalysator. Durch Ammoniak werden Chlorkalklösungen beim Kochen vollständig reduziert zu $CaCl_2$ das NH_3 wird zu N_2 und H_2O oxydiert.

Calciumchlorat, $Ca(ClO_3)_2$. Durch Einleiten von Cl_2 in erwärmte Kalkmilch erhält man kein reines $Ca(ClO_3)_2$, es sind noch Salze niederer Chlorsauerstoffsäuren vorhanden (vgl. Alkalichlorate). Rein kann man das Salz erhalten aus reiner Chlorsäure durch Neutralisation mit $Ca(OH)_2$ oder $CaCO_3$. Es kristallisiert mit $2H_2O$. In Wasser und Alkohol ist es leicht löslich.

Calciumperchlorat, $Ca(ClO_4)_2$.

Calciumbromat, $Ca(BrO_3)_2$.

Calciumhypojodid, $Ca(JO)_2$, wird in wässriger Lösung erhalten aus $Ca(OH)_2$ und Jod. Es wirkt bleichend, zersetzt sich beim Erwärmen und am Licht.

Calciumjodat, $Ca(JO_3)_2$, wird erhalten aus HJO_3 und $Ca(OH)_2$ oder $CaCO_3$, oder auch durch Fällung eines Ca-Salzes mit Alkalijodat, da es in Wasser ziemlich schwer löslich ist. Es kristallisiert mit 6 und 4 H_2O.

Salze der Sauerstoffsäuren des Schwefels.

Calciumhydrosulfit, CaS_2O_4, wird erhalten aus CaH_2 und SO_2, $CaH_2 + 2SO_2 = CaS_2O_4 + H_2$ oder aus $CaCl_2$ und $Na_2S_2O_4$. Es ist in Wasser leicht löslich, die Lösung wirkt kräftig reduzierend.

Calciumsulfit, $CaSO_3$, wird erhalten aus $Ca(OH)_2$ oder $CaCO_3$ und SO_2 oder auch durch eine Fällungsreaktion z. B. von $CaCl_2$ mit Na_2SO_3, da es in Wasser schwer löslich ist: 0,043 g im Liter bei 18°. In Zuckerlösungen und in wässriger schwefliger Säure ist es leichter löslich. Im zweiten Fall bildet sich wahrscheinlich ein saures Salz $Ca(HSO_3)_2$. An der Luft oxydiert sich $CaSO_3$ leicht.

Calciumthiosulfat, CaS_2O_3, entsteht aus CaS (Sodarückständen) durch Oxydation an der Luft, oder auch aus $CaSO_3$, Schwefel und H_2O zwischen 30 und 40°. Es kristallisiert mit $6H_2O$. Beim Aufbewahren zersetzt es sich und liefert entweder $CaSO_3$ und S, oder CaS und $CaSO_4$.

Calciumsulfat, $CaSO_4$, kommt in der Natur wasserfrei als Anhydrit, mit $2H_2O$ als Gips (rein Alabaster, schön kristallisiert Marienglas) vor. $CaSO_4$ bildet sich beim Fällen eines Ca-Salzes mit H_2SO_4 oder einem Sulfat. Der natürliche Anhydrit $CaSO_4$ kristallisiert rhombisch. d 2,96. Er nimmt nur langsam Wasser auf. Eine zweite Modifikation des wasserfreien $CaSO_4$ wird erhalten durch Erwärmen von gefälltem $CaSO_4$, $2H_2O$ auf 60—90° im Vakuum über H_2SO_4 oder durch Erwärmen von mit viel Wasser versetzten gebrannten Gips auf 100°, löslicher Anhydrit. Er ist instabil gegen den gewöhnlichen Anhydrit, also leichter löslich und geht in Berührung mit Wasser in der Wärme allmählich in diesen über. Er nimmt rasch Wasser auf, erhärtet. Außer diesen beiden gibt es wahrscheinlich noch weitere Modifikationen des wasserfreien $CaSO_4$.

Das Halbhydrat, $2CaSO_4 . H_2O$, entsteht aus dem gewöhnlichen Gips beim Erhitzen auf über 107°. In Kristallen kann man es bekommen beim Erwärmen von Gips mit konzentrierter HNO_3 (d 1,4) auf 40°. Das Dihydrat, $CaSO_4 . 2H_2O$, der gewöhnliche Gips, kristallisiert monoklin. d 2,32.

Die vierfachen Punkte des Systems $CaSO_4$ —H_2O, an denen Dampf, Lösung und Dihydrat mit einer der drei anderen festen

Phasen im Gleichgewicht stehen (vgl. Phasenregel und Calciumchlorid), liegen bei folgenden Temperaturen

feste Phasen		Temp.
$CaSO_4 . 2H_2O$	$CaSO_4$ (gewöhnl. Anhydrit)	66°
,,	$CaSO_4$ (löslicher Anhydrit)	89°
,,	$2CaSO_4, H_2O$ (Halbhydrat)	107°

An diesen Umwandlungspunkten geht bei steigender Temperatur das Dihydrat in die anderen Formen über. Wie man sieht, erfolgt der Uebergang in den löslichen Anhydrit bei höherer Temperatur als der in den gewöhnlichen, und der in das Halbhydrat bei höherer als der in den löslichen Anhydrit. Löslicher Anhydrit und Halbhydrat sind also metastabil gegen gewöhnlichen Anhydrit. Daran liegt es wohl auch, daß sie in der Natur nicht vorkommen. Bei den meisten kristallwasserhaltigen Salzen liegen übrigens die Verhältnisse so, daß die Umwandlungstemperatur steigt mit sinkendem Wassergehalt, der Gips bildet in dieser Hinsicht eine Ausnahme.

Stuckgips, gebrannter Gips wird technisch dargestellt durch Erhitzen von natürlichem $CaSO_4 . 2H_2O$ auf etwa 130°. Er besteht der Hauptmenge nach aus Halbhydrat, enthält aber auch Anhydrit. Stuckgips hat die Eigenschaft, nach dem Anrühren mit Wasser unter Wärmeentwickelung in relativ kurzer Zeit (8 bis 10 Minuten) zu erhärten. Es wird Dihydrat zurückgebildet. (Verwendung des Stuckgipses zu Modell- usw. Arbeiten.)

Estrichgips ist durch Brennen bei höherer Temperatur aus Dihydrat erhaltenes wasserfreies $CaSO_4$, von geringerer Erhärtungsgeschwindigkeit, aber größerer Festigkeit der erhärteten Masse. Er besteht aus einem Gemenge zweier Anhydritmodifikationen (triklin und hexagonal). Bei beiden Arten des gebrannten Gipses läßt sich die Erhärtungsgeschwindigkeit durch Salze, die als Katalysatoren wirken, beschleunigen oder auch verzögern.

Calciumsulfat zersetzt sich bei starkem Erhitzen (Weißglut) in CaO und SO_3 (SO_3 zerfällt weiter in SO_2 und O_2). Durch HCl wird $CaSO_4$ bei Rotglut in $CaCl_2$ umgewandelt. Durch Wasserstoff, Kohle usw. wird $CaSO_4$ relativ leicht reduziert zu CaS. Diese Reduktion erfolgt durch organische Substanzen unter Umständen schon in wässriger Lösung.

Die Löslichkeit des Gipses ist nicht ganz sicher bekannt, da sich erhebliche Einflüsse der Korngröße des Bodenkörpers bemerkbar machen. Die Löslichkeit besitzt ein Maximum zwischen 30 und 40°. Für 18° gibt Kohlrausch an: 2023 mg im Liter. Die Löslichkeit des Gipses ist erhöht in fast allen Salzlösungen, vorausgesetzt, daß es nicht verdünnte Lösungen von Ca-Salzen oder Sulfaten sind. Auch in Salzsäure und Salpetersäure ist die Löslichkeit größer. In konzentrierter Schwefelsäure löst sich Gips in relativ erheblichen Mengen, bei 25° 2,84 g $CaSO_4$ in 75 g H_2SO_4. Gesättigte Gipslösung wird als Eichflüssigkeit für Leitfähigkeitsgefäße verwandt. Eine bei 18° gesättigte Lösung hat ein Leitvermögen $\varkappa = 0{,}001880$.

Saure Salze des Calciumsulfats: $CaSO_4, H_2SO_4$; $CaSO_4 . 3H_2SO_4$.

Doppelsalze: $CaSO_4 . Na_2SO_4$ Glauberit; $CaSO_4 . K_2SO_4, H_2O$ Syngenit; $CaSO_4(NH_2)SO_4 . H_2O$. Calciumammoniumsulfat; $Ca_2Mg K_2(SO_4)_4 . 2H_2O$ Polyhalit.

Salze des Calciums mit den Säuren der Stickstoffgruppe.

Calciumnitrit, $Ca(NO_2)_2$, wird dargestellt durch schwaches Glühen von Calciumnitrat, rein aus $AgNO_2$ und $CaCl_2$. Es kristallisiert mit $1H_2O$ isomorph mit den Strontium- und Bariumsalzen. In Wasser leicht, in Alkohol schwer löslich. Bei 20° lösen 100 ccm H_2O 111,6 g $Ca(NO_2)_2, H_2O$.

Calciumnitrat, $Ca(NO_3)_2$, bildet sich in der Natur bei der Verwesung stickstoffhaltiger organischer Substanzen, es wird dargestellt aus $Ca(OH)_2$ oder $CaCO_3$ und Salpetersäure. Calciumnitrat ist das wichtigste Produkt bei der technischen Oxydation des atmosphärischen Stickstoffs (Norgesalpeter). Schmelzpunkt etwa 560°. d 2,36. Mit Wasser bildet es verschiedene Hydrate, sicher bekannt ist das Tetrahydrat, $Ca(NO_3)_2 . 4H_2O$, es existieren noch Hydrate mit 3 und $2H_2O$. Das wasserfreie Salz kristallisiert regulär, das Tetrahydrat monoklin.

Calciumnitrat ist in Wasser sehr leicht löslich, bei 0° lösen 100 g H_2O 84,2 g $Ca(NO_3)_2$. In Alkohol ist $Ca(NO_3)_2$ ebenfalls leicht löslich. Die Lösungen besitzen elektrische Leitfähigkeit.

Calciumdihydrohypophosphit, $Ca(H_2PO_2)_2$, kann aus der Lösung gewonnen werden, die man beim Kochen von Kalkmilch mit Phosphor bei der Darstellung von Phosphorwasserstoff erhält. Es bildet sich auch bei der Zersetzung von Calciumphosphid mit Wasser. Das Salz kristallisiert monoklin, ist in Wasser leicht löslich.

Von Salzen der phosphorigen Säure sind bekannt: Calciumhydrophosphit, $CaHPO_3$ und Calciumdihydrophosphit, $Ca(H_2PO_3)_2$.

Calciumsalze der Phosphorsäure. Von der Orthophosphorsäure, H_3PO_4, leiten sich drei Calciumsalze ab:

Calciumdihydrophosphat, primres Calciumphosphat, $Ca(H_2PO_4)_2$.

Calciumhydrophosphat, sekundäres Calciumphosphat, $CaHPO_4$.

Calciumphosphat, tertiäres Calciumphosphat, $Ca_3(PO_4)_2$.

Sodann ist noch bekannt quaternäres Calciumphosphat (Calciumtetraphosphat), $Ca_4P_2O_9$, daß sich von der höher hydratisierten Phosphorsäure, $H_8P_2O_9$, ableitet.

Von allen Salzen existieren sicher oder wahrscheinlich ein oder mehrere Hydrate. Die Verhältnisse in dem System CaO, P_2O_5, H_2O sind wegen der großen Zahl der möglichen festen Phasen ziemlich kompliziert, auch ist die experimentelle Untersuchung wegen der bei gewöhnlicher Temperatur sehr geringen Geschwindigkeit, mit der sich die Gleichgewichte einstellen, mit Schwierigkeiten verknüpft. Eine ausführliche Darstellung, der jetzt einigermaßen geklärten Verhältnisse würde hier zu weit führen, es sei auf die Arbeit von Henry Bassett, Ztschr. für Anorg. Ch. 59, 1ff. (1908) verwiesen. Da Phosphorsäure eine ziemlich schwache Säure ist, so werden die Ca-Salze in wässriger Lösung hydrolytisch gespalten. Wird dabei das Löslichkeitsprodukt eines anderen Salzes überschritten, so muß sich dieses ausscheiden. Nach genügend langer Zeit wird sich eine feste Phase vollständig in die andere umgewandelt haben. In der Lösung entspricht dann natürlich das Verhältnis von CaO zu P_2O_5 nicht dem im ursprünglichen Salz.

Calciumdihydrophosphat, $Ca(HPO_4)_2$, kristallisiert mit $1H_2O$ in rhombischen Kristallen aus sauren Lösungen, die $Ca^{\cdot\cdot}$- und Phosphorsäureionen enthalten. Das Kristallwasser wird bei längerem Erhitzen auf 100° abgegeben. Bei 152° schmilzt das Monohydrat zum Teil, d. h. es zerfällt in wasserfreies Salz $Ca(HPO_4)_2$ und Lösung. Beim Erhitzen von $Ca(HPO_4)_2.H_2O$ mit konzentrierter H_3PO_4 auf 170—180° erhält man $Ca(HPO_4)_2$ in triklinen Kristallen. Beim Erhitzen gibt $Ca(HPO_4)_2$ erst Wasser und dann P_2O_5 ab, es bildet sich tertiäres Salz. In Wasser ist primäres Phosphat relativ leicht löslich, wenn mehr als 5 g im Liter gelöst sind, scheidet sich jedoch schwer lösliches sekundäres Salz ab.

Calciumhydrophosphat, $CaHPO_4$, wird erhalten durch Fällung von $CaCl_2$ mit sekundärem Alkaliphosphat oder auch einem Gemisch von sekundärem und primärem Ammoniumphosphat, je nach den Fällungsbedingungen mit $2H_2O$ oder wasserfrei. Oberhalb 36° und schnell bei 70° zerfällt das Dihydrat in wasserfreies Salz, $Ca_3(PO_4)_2$ und Lösung. Aus dem Dihydrat erhält man wasserfreies Salz beim Kochen mit Wasser oder Alkohol. Die Löslichkeit der sekundären Phosphate in Wasser ist ziemlich gering. Es wird angegeben für das Dihydrat, daß bei 30° im Liter enthalten sind 0,0954 g CaO und 0,2066 g P_2O_5. $\frac{H_3PO_4}{CaO} = 1{,}71$. Die Kurve der Abhängigkeit der Löslichkeit von $CaHPO_4.2H_2O$ von der Temperatur zeigt bei 60° eine Krümmung, weil dort die Umwandlung in $CaHPO_4$ und $Ca_3(PO_4)_2.H_2O$, die eigentlich schon bei 36° beginnt, mit erheblicherer Geschwindigkeit verläuft. Dihydrat und wasserfreies Salz sind etwa gleich stark löslich, doch ist die Lösungsgeschwindigkeit des wasserfreien Salzes geringer.

Calciumanhydrophosphat, tertiäres Calciumphosphat $Ca_3(PO_4)_2$, ist in reinem Zustande nicht mit Sicherheit bekannt. Sowohl die in der Natur vorkommenden als tertiäre Salze aufgefaßten Verbindungen (Phosphorite), wie die durch Fällung eines Ca-Salzes mit tertiärem Alkaliphosphat oder sekundärem bei Gegenwart von NH_3 erhaltenen Niederschläge weichen im allgemeinen in ihrer Zusammensetzung weit von der Formel ab. Sie sind wahrscheinlich Hydrogele von Gemischen zwei oder mehrerer der folgenden Stoffe: $CaHPO_4$, $Ca_3(PO_4)_2$, $Ca_4P_2O_9$, $Ca(OH)_2$. Es scheint jedoch fast sicher, daß es eine Reihe von Lösungen gibt, die mit $Ca_3(PO_4)_2$ im Gleichgewicht stehen.

Tetracalciumphosphat, $Ca_4P_2O_9$, bildet einen Bestandteil der Thomasschlacke. Es kann in Berührung mit einer Lösung, die CaO und P_2O_5 enthält, innerhalb eines bestimmten Konzentrationsintervalles in Form eines Hydrates bestehen. Durch reines Wasser wird es ebenso wie die anderen Phosphate zersetzt, es ist aber das einzige, das dabei eine alkalisch reagierende Lösung liefert.

In starken Säuren sind alle Calciumphosphate, als Salze einer relativ schwachen Säure leicht löslich. Auch in organischen Säuren lösen sie sich, z. B. Essigsäure und besonders Zitronensäure, hier scheint eine spezifische Wirkung zu bestehen. Eine Erhöhung der Löslichkeit wird auch herbeigeführt durch CO_2, und manche Salze, wie NaCl, NH_4NO_3, Na-Acetat, und namentlich Ammoniumcitrat (Komplexbildung).

Calciumphosphate werden durch Kohle im elektrischen Lichtbogen zu Phosphor reduziert (Darstellung von Phosphor). Man setzt SiO_2 zu, um CaO zu binden und alles Phosphat zu reduzieren. Chlor und Kohlenoxyd reagieren bei Gegenwart von Kohle oberhalb 180° auf Calciumphosphat unter Bildung von Phosphoroxychlorid, CO_2 und $CaCl_2$.

Früher meist als tertiäre Salze aufgefaßte Ca-Phosphate kommen in der Natur vor: Osteolith, Phosphorit, mit CaF_2 oder $CaCl_2$ zusammen als Apatit. Ca-Phosphate

bilden einen Hauptbestandteil der Knochen (50 bis 60%) und Zähne. Wichtig sind Calciumphosphate als Düngemittel: Guano (Vogelexkremente mit 25% Phosphat), Superphosphat aus Apatit und Phosphorit durch Aufschließen mit Schwefelsäure erhalten, Thomasschlacke, Nebenprodukt bei der Entphosphorung des Eisens in der Bessemerbirne.

Calciummetaphosphat, $Ca(PO_3)_2$, war früher wichtig für die Darstellung des Phosphors.

Von Calciumarsenaten sind dargestellt worden das tertiäre $Ca_3(AsO_4)_2$ und das sekundäre $CaHAsO_4$, dieses mit $2H_2O$. Wasserfrei kommt das sekundäre Salz als Pharmakolith und Haidingerit vor.

Ein Calciumsulfarsenit, $CaS.As_2S_3.4H_2O$ ist bekannt.

Salze des Calciums mit den Säuren der Kohlenstoffgruppe.

Calciumcarbonat, $CaCO_3$, entsteht aus CaO und CO_2 nur bei Gegenwart von Feuchtigkeit. Ueber die Gleichgewichtsbeziehungen zwischen CaO, CO_2 und $CaCO_3$ vgl. Calciumoxyd. $CaCO_3$ fällt als schwer löslicher Niederschlag, wenn $Ca^{\cdot\cdot}$- und CO_3''-Jonen zusammentreffen. In der Natur kommt $CaCO_3$ vor als Kalkspat (Calcit) hexagonal rhomboedrisch. d 2,715. Wichtig ist die Verwendung sehr reiner und klarer Stücke, die sich in Island finden (isländischer Doppelspat, wegen der starken Doppelbrechung, die sie zeigen) zur Herstellung von Nicolschen Prismen. Brechungsexponent für die D-Linie für den ord. Strahl 1,6585, für den außerord. Strahl 1,4864.

Varietäten des Kalkspats sind: Marmor, meist sehr rein, kristallinisch, Kalkstein derb, fein kristallinisch und häufig stark verunreinigt. Wichtig als Ausgangsmaterial für die Zementfabrikation ist der eine Mischung von Kalkstein und Ton darstellende Mergel. Ob das $CaCO_3$ in der Kreide kristallinisch oder amorph ist, ist noch unsicher.

Calciumcarbonat ist polymorph. Die zweite wichtige Modifikation ist der in der Natur vorkommende rhombische Aragonit. d 2,934. Durch Ausfällen aus wässrigen Lösungen kann man $CaCO_3$ sowohl als Calcit wie als Aragonit bekommen. Es hängt dies von den besonderen Fällungsbedingungen ab: Konzentration, Temperatur, Geschwindigkeit der Fällung, Gegenwart von fremden Stoffen. In der Kälte fällt $CaCO_3$ zuerst amorph aus, wandelt sich aber allmählich in Calcit um. In der Hitze fällt aus verdünnten Lösungen Aragonit. Beim Erhitzen wandelt sich Aragonit in Calcit um. Dies deutet darauf hin, daß Calcit bei höheren Temperaturen die beständigere Form ist. In Wasser ist Aragonit leichter löslich als Kalkspat. Daher muß auch bei gewöhnlicher Temperatur Calcit die beständigere Form sein. Daß Aragonit trotzdem in der Natur vorkommt, ist der außerordentlich geringen Umwandlungsgeschwindigkeit zuzuschreiben.

Eine dritte Modifikation des Calciumcarbonats ist der Konchit, der sich in den Schalen von Mollusken findet, optisch einachsig. Außerdem soll noch eine vierte monosymmetrische oder asymmetrische Form existieren.

$CaCO_3$ kann unter CO_2-Druck geschmolzen werden. Der Schmelzpunkt liegt unter dem des Goldes. Die Schmelze erstarrt kristallinisch (Marmor).

Calciumcarbonat ist in Wasser nur sehr wenig löslich. Bei 18° lösen sich im Liter 13 mg Calcit und 15 mg Aragonit. Die Löslichkeit wird beträchtlich erhöht durch NH_4-Salze. $CaCO_3$ löst sich in CO_2-haltigem Wasser in erheblichen Mengen auf. CO_2 bildet mit Wasser H_2CO_3. Dies setzt sich mit den zunächst nur in sehr geringer Konzentration in der Lösung vorhandenen CO_3''-Ionen um nach der Gleichung

$$H_2CO_3 + CO_3'' = 2HCO_3'.$$

CO_3''-Ionen werden also gebunden, neues $CaCO_3$ kann in Lösung gehen. In der Lösung sind enthalten die Ionen des Salzes $Ca(HCO_3)_2$, Calciumhydrocarbonat, saures Calciumcarbonat. Bei 16° und einem Partialdruck des CO_2 von 0,9841 Atm. lösen sich 1086 mg $CaCO_3$ oder 21,72 Aequiv. $Ca^{\cdot\cdot}$ im Liter. Eine Verbindung, die etwa der Formel $CaCO_3.1{,}75H_2CO_3$ entspricht, ist durch Vermischen einer eiskalten Lösung von $CaCl_2$ mit einer solchen von NH_4HCO_3 erhalten worden. Das Leitvermögen für gesättigte $CaCO_3$-Lösungen beträgt bei 18°: für gefälltes $CaCO_3$ $\varkappa = 29{,}0.10^{-6}$, Kalkspat $\varkappa = 28{,}0.10^{-6}$, Aragonit $\varkappa = 32{,}6.10^{-6}$.

$CaCO_3$ löst sich in Säuren unter CO_2-Entwicklung auf, um so schneller, je stärker die Säure ist.

Hydrate des $CaCO_3$ mit 5 und $6H_2O$ sind beschrieben worden.

Calciumsilikate kommen in Verbindung mit anderen Silikaten vielfach in der Natur vor. Wollastonit, $CaSiO_3$, ist reines Calciummetasilikat, monoklin. $CaSiO_3$ kann auch künstlich dargestellt werden, sowohl aus dem Schmelzfluß wie auf nassem Wege.

Außerdem existieren noch folgende Verbindungen: $3CaO.2SiO_2$; $2CaO.SiO_2$; $3CaO.SiO_2$.

Calciumsilikate bilden wesentliche Bestandteile des Glases und der Zemente.

Calciumborate kann man durch Fällen aus wässrigen Lösungen und durch Zusammenschmelzen von CaO und B_2O_3 darstellen. Durch Fällen von $CaCl_2$-Lösung

mit Natriummetaborat erhält man Calciummetaborat $Ca(BO_2)_2$; es ist schwer löslich in Wasser, leicht in Ammoniumsalzlösungen und in starken Säuren. Calciummetaborat ist dimorph.

Aus $Ca(OH)_2$ und $CaCO_3$ mit Borsäure sind folgende Borate dargestellt worden: $CaB_8O_{13}.9H_2O$; $CaB_6O_{10}.4H_2O$; $CaB_4O_7.8H_2O$. Lösungen von $CaCl_2$ und Borax geben je nach den Versuchsbedingungen Niederschläge sehr verschiedener Zusammensetzung. In der Schmelze von CaO und B_2O_3 ist die Existenz folgender Verbindungen nachgewiesen worden: $CaO.2B_2O_3$; $CaO.B_2O_3$; $2CaO.B_2O_3$.

Calciumacetat, $Ca(C_2H_3O_2)_2$, kristallisiert aus heißen Lösungen mit $1H_2O$, aus kalten mit $2H_2O$. In 100 g H_2O lösen sich bei 20° 34,73 g $Ca(C_2H_3O_2)_2$.

Calciumoxalat, CaC_2O_4, ist wichtig als Fällungsmittel für Calcium, da es in Wasser sehr schwer löslich ist. Bei 18° lösen sich 5,54 mg CaC_2O_4, H_2O im l. CaC_2O_4 kristallisiert bei gewöhnlicher Temperatur mit $1H_2O$, bei niedrigerer mit $3H_2O$. Das Kristallwasser geht bei 200° fort, beim Glühen bildet sich zunächst CO und $CaCO_3$. CaC_2O_4 bildet wahrscheinlich mit $MgCl_2$ und $ZnCl_2$ in wässriger Lösung komplexe Verbindungen, mit $CaCl_2$ sind Doppelsalze auch in festem Zustand bekannt.

7. Thermochemie. Bildungs- und Lösungswärmen der wichtigsten Calciumverbindungen. Die Bildungswärmen sind die aus den Elementen, die Lösungswärmen, die der kristallwasserfreien Stoffe in viel Wasser. Die Zahlen gelten für je ein g-Molekül in kg-Kalorien (für Halogenide, Oxyd und Hydroxyd nach neueren Arbeiten von de Forcrand, für die übrigen Stoffe nach Landolt-Börnstein, Tabellen 1905).

	Bildungswärme	Lösungswärme
Calciumion $Ca^{\cdot\cdot}$	110	
Calciumfluorid CaF_2	239,18	
Calciumchlorid $CaCl_2$	190,44	17,48
Calciumbromid $CaBr_2$	169,20	24,52
Calciumjodid CaJ_2	141,00	28,12
Calciumoxyd CaO	152,0	18,12
Calciumhydroxyd $Ca(OH)_2$	236,0	2,8
Calciumsulfid CaS	92,0	
Calciumcarbid CaC_2	— 7,25	
Calciumsulfat $CaSO_4$	318,4	4,44
Calciumnitrat $Ca(NO_3)_2$	203	395
Calciumcarbonat $CaCO_3$	270,5	

8. Photochemie. Flüchtige Calciumverbindungen färben die Flamme ziegelrot. Das eigentliche Linienspektrum des Calciums bekommt man nur in der Flamme des elektrischen Lichtbogens. Es sind eine große Zahl von Linien gemessen worden (vgl. Fehlings Handwörterbuch Bd. 6, Artikel „Spektralanalyse"). In der Bunsenflamme erhält man immer die Banden des Oxyds und, wenn man eine Halogenverbindung anwendet, die diesen zugehörigen Banden, von Metallinien nur die im Violett (422,691 $\mu\mu$). Nach Treadwell sind die wichtigsten Oxydbanden: Orangegelbes Doppelband (620,3 $\mu\mu$, 618,2 $\mu\mu$) und ein gelbgrünes Band (554,4 $\mu\mu$, 551,8 $\mu\mu$). Mit HCl befeuchtetes $CaCl_2$ gibt Bänder: im Orangegelb 646,6 $\mu\mu$, Doppelband (606,9 $\mu\mu$, 604,5 $\mu\mu$) und 593,4 $\mu\mu$; im Gelb 581,7 $\mu\mu$ und 572,0 $\mu\mu$ im Violett die erwähnte Metallinie.

Auf die Phosphoreszenz von CaS und CaF_2 wurde schon hingewiesen.

Zur Kolloidchemie des Calciums vgl. in diesem Artikel unter e) den Schluß des Abschnitts „Barium").

Literatur. *O. Sackur, Calcium. In Abeggs Handbuch der anorganischen Chemie, Bd. II2, Leipzig 1905. — Fr. Ephraim, Calcium. In Gmelin-Krauts Handbuch der anorganischen Chemie, Bd. II2, Heidelberg 1909.*

F. Flade.

d) Strontium.

Sr. Atomgewicht 87,63.

1. Atomgewicht. Vorkommen. Geschichte. Die internationale Atomgewichtskommission setzt das Atomgewicht des Strontiums (Sr) für 1912 = 87,63.

Strontium kommt in der Natur ziemlich selten vor. Die wichtigsten Mineralien sind Cölestin (Sulfat) und Strontianit (Carbonat).

Daß die Erde des Strontianits von der des Kalks und des Baryts verschieden ist, entdeckten 1790 Crawford und 1793 Klaproth und Hoppe.

2. Darstellung und Eigenschaften. Metallisches Strontium wird durch Elektrolyse von geschmolzenem Strontiumchlorid $SrCl_2$ erhalten. In kristallisierter, reiner Form ist es durch Sublimation im Vakuum gewonnen worden entweder durch Erhitzen eines Gemisches von SrO und Al oder von Strontiumhydrid SrH_2. Das Hydrid wird aus Strontiumamalgam dargestellt, indem man dieses erst im Vakuum zur Vertreibung des Quecksilbers erhitzt und das erhaltene Rohstrontium weiter im H_2-Strom behandelt. Sr-Amalgam erhält man aus $SrCl_2$-Lösungen durch Elektrolyse an Hg-Elektroden oder durch Umsetzung mit Na-Amalgam.

Metallisches Strontium ist silberweiß, wird aber an der Luft gelb (Nitridbildung). Es ist etwa so weich wie Blei. d 2,55. Es schmilzt bei etwa 800° und ist oberhalb 950° merklich flüchtig.

3. Elektrochemie. Die Normalvalenz des Strontiums ist = 2. Verbindungstypen: SrH_2, $SrCl_2$, SrO, $SrSO_4$. Nur ein Strontium-Ion ist bekannt $Sr^{\cdot\cdot}$. Es ist farblos. Seine Bildungswärme beträgt 119790 g-cal. Die Beweglichkeit der $Sr^{\cdot\cdot}$-Ionen beträgt bei 18° 51, der Temperaturkoeffizient 0,0247. Das Normalpotential des Strontiums wird auf Grund thermochemischer Daten zu $\varepsilon_h =$ — 2,7 Volt geschätzt. Komplexe Ionen sind nicht mit Sicherheit bekannt, doch ist deren Existenz aus gleichen Gründen wie beim Calcium wahrscheinlich.

4. Analytische Chemie. Flüchtige Strontiumverbindungen werden an der karmoisinroten Flammenfärbung erkannt. In Wasser schwer löslich sind dieselben Verbindungen wie beim Calcium, nur sind Fluorid und Oxalat etwas leichter, Sulfat etwas schwerer löslich, auch das Chromat ist relativ schwer löslich. Als Fällungsreaktionen für Strontium werden die als Karbonat und als Sulfat benutzt, letztere erfolgt auch durch Gipslösung. Die quantitative Bestimmung des Strontiums erfolgt als Sulfat oder auch als Oxyd, das durch Glühen aus Karbonat oder Oxalat erhalten wird. Die Trennung des Strontiums von anderen Metallen geschieht nach den gleichen Methoden wie beim Calcium. Ueber die Trennung von Calcium und Barium siehe in diesem Artikel unter e) „Barium".

5. Spezielle Chemie. Die chemischen Eigenschaften des Strontiums selbst, wie die seiner Verbindungen entsprechen im allgemeinen denen des Calciums.

5a) Chemisches Verhalten des metallischen Strontiums. Es reagiert bei höheren Temperaturen meist sehr lebhaft mit O_2 (rote Flamme), N_2, H_2, den Halogenen, S, P, HCl, H_2S, CO_2. Auf Wasser und verdünnte Säuren wirkt Strontium etwas lebhafter als Calcium unter H_2-Entwickelung ein. Auch mit Alkohol reagiert es unter H_2-Entwickelung. Von konzentrierter HNO_3 wird es nicht angegriffen, von rauchender H_2SO_4 langsam, schnell von SO_3. In flüssigem NH_3 ist es mit blauer Farbe löslich. Mit Fe und Ni bildet es Legierungen.

5b) Verbindungen des Strontiums. *α*) Verbindungen mit Nichtmetallen. Strontiumhydrid, SrH_2 entsteht aus metallischem Strontium oder Strontiumamalgam im Wasserstoffstrom beim Erhitzen auf 700° bis 1000°. Seine Eigenschaften entsprechen denen des Calciumhydrids. Es vermag noch Wasserstoff aufzunehmen. Gegen trockene Luft ist es bei gewöhnlicher Temperatur beständig, bei Rotglut verbrennt es.

Strontiumfluorid, SrF_2 entsteht aus $Sr(OH)_2$ oder $SrCO_3$ und Flußsäure, kristallinisch (regulär) beim Schmelzen von $SrCl_2$, NaCl und NaF. SrF_2 ist in Wasser schwer löslich: 117,3 mg im Liter bei 18°.

Strontiumchlorid, $SrCl_2$ wird dargestellt durch Einwirkung von Salzsäure auf Strontiumkarbonat. Das wasserfreie Salz schmilzt bei 800° bis 900°. d 3,051. $SrCl_2$ kristallisiert mit 2 und 6 H_2O. Das Dihydrat $SrCl_2.2H_2O$ entsteht, wenn die wässrigen Lösungen zwischen 60° und 100° zur Kristallisation gebracht werden, es bildet rektanguläre Tafeln. Das Hexahydrat $SrCl_2.6H_2O$ bildet sich, wenn die Kristallisation bei gewöhnlicher Temperatur erfolgt, hexagonale Nadeln.

$SrCl_2$ ist in Wasser leicht löslich. Eine bei 18° gesättigte Lösung enthält in 100 g Lösung 33,7 g $SrCl_2$ (physikalische Eigenschaften der $SrCl_2$-Lösungen bei Abegg, Handbuch Bd. 2, 2). In Aethylalkohol ist $SrCl_2$ schwer löslich, 1 Tl. $SrCl_2.2H_2O$ in 116,4 Tl. kaltem Alkohol.

$SrCl_2$ absorbiert ebenso wie $CaCl_2$ Ammoniak unter Bildung einer festen Verbindung.

Strontiumbromid, $SrBr_2$. Darstellung entsprechend der des $CaBr_2$, am einfachsten aus $Sr(OH)_2$ oder $SrCO_3$ und HBr.

Das wasserfreie Salz schmilzt oberhalb 630°. d 4,201. $SrBr_2$ kristallisiert mit $6H_2O$ in Nadeln. In Wasser ist $SrBr_2$ leicht löslich. 100 Tl. bei 18° gesättigte Lösung enthalten 51,7 Tl. $SrBr_2$. In Alkohol ist $SrBr_2$ löslich. Aus den Lösungen scheiden sich Kristalle ab von der Formel $2SrBr_2.5C_2H_5OH$. Mit NH_3 bildet $SrBr_2$ eine Additionsverbindung: $2SrBr_2.NH_3$.

Strontiumjodid, SrJ_2 wird nach den gleichen Methoden erhalten wie CaJ_2. Es schmilzt oberhalb 507°, bei Luftzutritt unter Abspaltung von Jod. d^{25}_4 4,549. Es kristallisiert mit 6 und bei 60° mit $7H_2O$. In Wasser ist SrJ_2 leicht löslich, 100 g der bei 18° gesättigten Lösung enthalten 63,5 g SrJ_2.

SrJ_2 löst sich in Methyl-, Aethyl- und Propylalkohol. Die Lösungen besitzen elektrische Leitfähigkeit.

Eine oder mehrere Verbindungen von SrJ_2 mit J, Strontiumperjodide existieren, sind aber noch nicht genauer untersucht.

Strontiumoxyd, SrO entsteht durch Glühen von Strontiumhydroxyd, Carbonat, Nitrat usw. als amorphe, weiße Masse. d 3,9 bis 4,6. Kristallisiert ist es im elektrischen Ofen in zwei Formen erhalten worden. Es schmilzt leichter als CaO, schwerer als

BaO zwischen 2000° bis 3000°. Mit Wasser reagiert SrO unter Bildung von $Sr(OH)_2$.

Strontiumhydroxyd. Es wird technisch dargestellt aus Strontianit ($SrCO_3$) durch Glühen und Löschen des gebildeten SrO mit H_2O. Cölestin ($SrSO_4$) reduziert man zuerst mit Kohle zu SrS und setzt dieses entweder durch Alkalien (NaOH) direkt zu $Sr(OH)_2$ um oder fällt erst durch CO_2 $SrCO_3$, um daraus wie aus Strontianit erst SrO und dann $Sr(OH)_2$ zu gewinnen. Man kann auch direkt aus $SrSO_4$ $SrCO_3$ erhalten, z. B. durch Umsetzung mit Na_2CO_3 und CO_2 unter Druck.

Strontiumhydroxyd kristallisiert aus der heiß gesättigten Lösung mit $8H_2O$ (Oktohydrat) in tetragonalen Kristallen. Diese verwittern leicht und bilden Monohydrat $Sr(OH)_2.H_2O$. Bei 100° bildet sich wasserfreies $Sr(OH)_2$. d 3,625. Dieses geht bei 850° in SrO über. In Wasser ist Strontiumhydroxyd schwer löslich. Bei 20° sind in der gesättigten Lösung 0,68 g SrO oder 1,74 g $Sr(OH)_2$,$8H_2O$ in 100 g der Lösung enthalten. Die Lösung reagiert alkalisch (Strontianwasser). $Sr(OH)_2$ ist in einer $^1/_{64}$ n-Lösung bei 25° zu 92% dissoziiert. In Zuckerlösungen ist Strontiumhydroxyd leicht löslich, es bildet sich ein Saccharat (Verwendung in der Zuckerindustrie).

Strontiumsuperoxyd, SrO_2 kann nicht wie BaO_2 aus SrO durch Glühen an der Luft gewonnen werden, es entsteht allerdings in kleinen Mengen durch Glühen von $SrCO_3$ im Sauerstoffstrom. Das Oktohydrat $SrO_2.8H_2O$ fällt aus beim Zusatz von H_2O_2 oder Na_2O_2-Lösungen zu solchen von $Sr(OH)_2$. Es ist schwer löslich in Wasser. Bei 100° gibt es das Kristallwasser ab, bei höherer Temperatur Sauerstoff.

Strontiumsulfid, SrS wird dargestellt aus Sulfat durch Reduktion mit Kohle, rein durch Erhitzen von SrO in einem Strom von CO_2-haltigem Schwefelkohlenstoffdampf. Kristallinisch (regulär) ist es im elektrischen Ofen aus $SrSO_4$ und C erhalten worden. Mit kleinen Mengen fremder Bestandteile vermengt zeigt SrS ausgezeichnete Phosphoreszenz.

Strontiumhydrosulfid, $Sr(SH)_2$ entsteht durch Einleiten von H_2S in $Sr(OH)_2$ oder durch Auflösen von SrS in H_2S-haltigem Wasser. Beim Eindunsten der Lösung bilden sich Kristalle von unbekanntem Wassergehalt, die beim Erwärmen erst H_2O und dann H_2S abgeben und in SrS übergehen.

Strontiummonosulfid, SrS nimmt beim Kochen mit Wasser und Schwefel diesen auf und bildet SrS_4, Strontiumtetrasulfid. Dies kristallisiert mit 4 und $2H_2O$. An der Luft oxydieren sich die Hydrate unter Bildung von Oxysulfiden.

Strontiumpentasulfid, SrS_5 bildet sich wahrscheinlich in der Kälte in einer Lösung von SrS_4 durch Schwefelaufnahme, ist aber in festem Zustand nicht bekannt, da beim Eindunsten ein Schwefelatom wieder abgegeben wird.

Strontiumnitrid, Sr_3N_2 bildet sich beim Erhitzen von Strontiumamalgam im N_2-Strom. Mit Wasser bildet es $Sr(OH)_2$ und NH_3. Beim Erhitzen mit Kohle entsteht zum Teil $Sr(CN)_2$, Strontiumcyanid.

Metallisches Strontium löst sich bei — 60° in flüssigem NH_3 zu einer dunkelblauen Flüssigkeit, die beim Abdunsten im Vakuum braunrote Kristalle von Strontiumammonium $Sr(NH_3)_6$ liefert, diese gehen im Vakuum weiter in Strontiumamid $Sr(NH_2)_2$ und schließlich wieder in Sr über. Die $Sr(NH_3)_6$-Lösung gibt mit CO Strontiumkarbonyl, $Sr(CO)_2$, schwach gelbes Pulver, mit NO gelatinöses Strontiumhyponitrit, $Sr(NO)_2$.

Strontiumarsenid, Sr_3As_2, Strontiumphosphid, Sr_3P_2, Strontiumcarbid, SrC_2, Strontiumsilicid, $SrSi_2$, Strontiumborid, SrB_6, entsprechen den betreffenden Ca-Verbindungen.

β) Salze mit den Sauerstoffsäuren. (Es sollen nur die wichtigsten angeführt werden): Strontiumchlorat, $Sr(ClO_3)_2$ wird analog wie das Calciumsalz dargestellt. Es kristallisiert gewöhnlich wasserfrei in rhombischen Oktaedern. Das wasserfreie Salz existiert noch in drei anderen Modifikationen. Ein Hydrat mit $3H_2O$ ist bekannt. Oberhalb 290° gibt $Sr(ClO_3)_2$ Sauerstoff ab.

Strontiumsulfat, $SrSO_4$ kommt wasserfrei als Cölestin in rhombischen Kristallen vor. Er ist isomorph mit Schwerspat ($BaSO_4$). Isomorphe Mischungen der beiden bilden den Barytcölestin. Strontiumsulfat fällt als schwer löslicher Niederschlag aus, wenn $Sr^{\cdot\cdot}$- und SO_4''-Ionen zusammentreffen. d des Cölestins 3,925, des gefällten $SrSO_4$ 3,71. Strontiumsulfat spaltet beim starken Glühen SO_3 ab und bildet SrO. Durch Kohle, CO, H_2, Fe, Zn wird $SrSO_4$ reduziert zu SrS.

Strontiumsulfat ist in Wasser schwerer löslich als $CaSO_4$, aber leichter als $BaSO_4$. Bei 18° lösen sich im Liter 114,3 mg $SrSO_4$. In Lösungen von Alkalinitraten und Chloriden ist die Löslichkeit erhöht (Komplexbildung?), ebenso in Säuren.

Strontiumnitrat, $Sr(NO_3)_2$ kann aus Hydroxyd, Carbonat mit HNO_3 dargestellt werden, technisch durch Umsetzung von konzentrierten $SrCl_2$-Lösungen mit $NaNO_3$.

Strontiumnitrat kristallisiert wasserfrei in Oktaedern. d 2,93. Es schmilzt bei 645° und gibt bei höherer Temperatur Sauerstoff ab. Tetrahydrat $Sr(NO_3)_2.4H_2O$ kristallisiert aus der kaltgesättigten Lösung. Das Wasser geht bei 100° fort.

Bei 20° lösen sich in 100 g H_2O 70,8 g

$Sr(NO_3)_2$. In flüssigem NH_3 löst sich $Sr(NO_3)_2$ ziemlich leicht auf. Die Lösung leitet den elektrischen Strom. In absolutem Alkohol ist $Sr(NO_3)_2$ schwer löslich, noch schwerer in einem Gemisch von Alkohol und Aether.

Strontiumorthophosphate. Im festen Zustand sind nur bekannt das sekundäre und das tertiäre Salz. $SrHPO_4$ und $Sr_3(PO_4)_2$. Die Darstellung, die Löslichkeitsverhältnisse usw. sind analog denen der entsprechenden Calciumsalze. Die Strontiumsalze scheinen jedoch etwas leichter löslich zu sein. Das tertiäre Salz ist nur amorph bekannt, das sekundäre ist auch kristallinisch aus dem zuerst entstehenden amorphen Niederschlag erhalten worden.

Strontiumkarbonat, $SrCO_3$ entsteht aus Lösungen von Strontiumsalzen durch Fällen mit Karbonaten. Aus Cölestin wird es technisch nach verschiedenen Methoden gewonnen z. B. durch Schmelzen mit Soda, durch Kochen mit $(NH_4)_2CO_3$-Lösungen, durch Umsetzung mit Na_2CO_3 und CO_2 unter Druck usw.

Das natürliche Strontiumkarbonat, Strontianit, kristallisiert rhombisch, isomorph mit Aragonit. Das gefällte $SrCO_3$ ist zunächst amorph, es kann aber auch kristallinisch erhalten werden z. B. durch Erhitzen mit Lösungen von $(NH_4)_2CO_3$ oder Harnstoff im geschlossenen Rohr. Man erhält längliche, stark doppelbrechende Prismen. Bei höherer Temperatur zersetzt sich $SrCO_3$ in SrO und CO_2. Da der Dissoziationsdruck geringer ist als bei $CaCO_3$, so erfolgt die Zersetzung schwieriger. Bei 1100° wird der CO_2-Druck größer als 1 Atmosphäre. d des gefällten $SrCO_3$ 3,62, des Strontianits 3,60 bis 3,62. In Wasser ist $SrCO_3$ sehr wenig löslich, bei 18° lösen sich in 1 l Wasser 11 mg. Die Lösung reagiert alkalisch, $SrCO_3$ ist hydrolytisch gespalten. In CO_2-haltigem Wasser ist die Löslichkeit erhöht (vgl. $CaCO_3$).

Strontiumoxalat, SrC_2O_4 (mit 2½ oder 1 H_2O) ist in Wasser leichter löslich als CaC_2O_4. Bei 18° lösen sich 46,1 mg im Liter.

6. Thermochemie. Bildungs- und Lösungswärme der wichtigsten Strontiumverbindungen (vgl. die Vorbemerkungen zur Thermochemie des Calciums):

	Bildungswärme	Lösungswärme
Strontiumion $Sr^{\cdot\cdot}$	120	
Strontiumchlorid $SrCl_2$	195,66	11,14
Strontiumbromid $SrBr_2$	176,50	16,10
Strontiumjodid SrJ_2	147,50	20,50
Strontiumoxyd SrO	139,64	29,76
Strontiumhydroxyd $Sr(OH)_2$	227,48	
Strontiumsulfid SrS	99,2	
Strontiumsulfat $SrSO_4$	330,9	
Strontiumnitrat $Sr(NO_3)_2$	211,9	—5,1
Strontiumkarbonat $SrCO_3$	281,2	

7. Photochemie. Flüchtige Strontiumverbindungen färben die Flamme intensiv rot. Hierauf beruht die Verwendung von Strontiumsalzen in der Feuerwerkerei. Man nimmt meist solche, die zugleich Sauerstoff abgeben, wie das Chlorat oder Perchlorat.

Das Linienspektrum des Strontiums entsteht im Knallgasgebläse und am schönsten im Flammenbogen (ein Verzeichnis der Wellenlängen der gemessenen Linien in Fehlings Handwörterbuch Bd. 6 Artikel „Spektralanalyse"). In der Bunsenflamme beobachtet man bei Anwendung von Halogenverbindungen vorübergehend deren Spektrum, dann nur das Bandenspektrum des Oxyds und die Metallinie im Blau (460,75 $\mu\mu$). Die Oxydbanden haben nach Treadwell folgende Lage: im Rot 686,3 $\mu\mu$, 674,7 $\mu\mu$, 662,8 $\mu\mu$, 649,9 $\mu\mu$, im Orangegelb 646,5 $\mu\mu$, 635,1 $\mu\mu$, ($SrCl_2$?), 606,0 $\mu\mu$.

Auf die Phosphoreszenz des SrS wurde schon hingewiesen.

Kolloidchemie des Strontiums am Schluß des Artikels „Barium".

Literatur. ***O. Sackur****, Strontium. In Abeggs Handbuch der anorganischen Chemie, Bd. II 2, Leipzig 1905. —* ***Fr. Ephraim****, Strontium. In Gmelin-Krauts Handbuch der anorganischen Chemie, Bd. II 2, Heidelberg 1909.*

F. Flade.

e) Barium.

Ba. Atomgewicht 137,37.

1. Atomgewicht, Vorkommen, Geschichte. 2. Darstellung und physikalische Eigenschaften des Metalls. 3. Elektrochemie. 4. Analytische Chemie. 5. Spezielle Chemie. a) Chemische Eigenschaften des Metalls. b) Verbindungen des Bariums: α) Verbindungen mit Nichtmetallen. β) Salze mit Sauerstoffsäuren. 6. Thermochemie. 7. Photochemie. 8. Kolloidchemie des Bariums zusammen mit der des Calciums und des Strontiums.

1. Atomgewicht, Vorkommen, Geschichte. Die internationale Atomgewichtskommission setzt das Atomgewicht des Bariums (Ba) für 1912 = 137,37.

Barium kommt in der Natur häufiger wie Strontium, aber nicht so häufig wie Calcium vor. Die wichtigsten Bariummineralien sind Schwerspat, Baryt ($BaSO_4$) und der seltenere Witherit ($BaCO_3$). Es gibt noch verschiedene seltener vorkommende Mineralien, die Barium-, Strontium- und Calciumverbindungen in isomorpher Mischung enthalten. In vielen Silikatgesteinen sind kleine Mengen von Barium enthalten.

Das Mineral Schwerspat ist schon sehr lange bekannt, aber erst Scheele fand 1774, daß die zum Schwerspat gehörende Erde von Kalkerde verschieden ist. Das Metall wurde zuerst von Davy 1808 dargestellt.

2. Darstellung und physikalische Eigenschaften des Metalls. Barium wird dargestellt aus Bariumamalgam durch langsames Erhitzen bis auf 850°. Das Amalgam kann man nach verschiedenen Methoden gewinnen, z. B. durch Elektrolyse einer angefeuchteten Masse von $BaCO_3$ und $Ba(OH)_2$ (Davy) oder eines Breies von $BaCl_2$ und Wasser, oder durch Einwirkung von Na-Amalgam auf $BaCl_2$-Lösung. Das so aus Amalgam gewonnene Ba ist noch nicht ganz rein, es kann ebenso wie Strontium gereinigt werden durch Ueberführung in Hydrid BaH_2 und folgender Destillation im Vacuum. Reines Ba erhält man auch durch Erhitzen von BaO und Al auf 1200° und Destillation des dabei erhaltenen unreinen Produktes.

Metallisches Barium ist silberweiß. Es ist weich wie Blei. d 3,78. Der Schmelzpunkt liegt bei etwa 850°, bei hohen Temperaturen ist es flüchtig. Die spezifische Wärme zwischen — 185° und + 20° beträgt 0,0681.

3. Elektrochemie. Die Existenz einer Verbindung mit einwertigem Barium: das Bariumsubchlorid BaCl ist sicher nachgewiesen, in allen anderen bekannten Verbindungen zeigt das Barium zwei positive Normalvalenzen. Dementsprechend haben wir dieselben Verbindungstypen wie beim Calcium und Strontium: BaH_2, $BaCl_2$, BaO, $BaSO_4$. Wir kennen nur ein Bariumion $Ba^{\cdot\cdot}$. Es ist farblos. Das Normalpotential des Bariums wird auf Grund thermochemischer Daten geschätzt auf $\varepsilon_h = -2,8$ Volt. Die Ionenbeweglichkeit beträgt nach Drucker 52,5, nach F. Kohlrausch 55, ihr Temperaturkoeffizient 0,0239

Die Neigung komplexe Ionen zu bilden ist geringer als beim Ca und Sr. Mit Sicherheit sind solche noch nicht nachgewiesen worden.

4. Analytische Chemie. Flüchtige Bariumverbindungen werden an der gelbgrünen Flammenfärbung erkannt. Von den schwer löslichen Verbindungen des Bariums sind die wichtigsten: Sulfat, Chromat, Fluorid, Karbonat, Oxalat. Die beiden ersten sind schwerer löslich als die entsprechenden Sr- und Ca-Verbindungen, die drei letzten leichter. Zum Nachweis des Bariums dienen meistens die Fällungen als Sulfat, Chromat und als Karbonat, gelegentlich wird auch das ebenfalls schwer lösliche Salz der Kieselfluorwasserstoffsäure ($BaSiF_6$) benutzt. Die quantitative Bestimmung des Bariums geschieht meist durch Ausfällen und Wägen als Sulfat, gelegentlich auch als Chromat. Titrimetrisch kann man durch Fällung als Chromat und Titration der Chromsäure nach jodometrischen Methoden oder durch Fällung als Oxalat und Titration mit Permanganat wie beim Calcium angegeben Barium bestimmen.

Die Trennung des Bariums von der Mehrzahl der anderen Metalle kann durch die Fällung als Sulfat geschehen. Doch ist dabei zu beachten, daß $BaSO_4$ sehr leicht andere Stoffe aus der Lösung mit niederreißt. Namentlich wenn Aluminium-, Chromi- und Ferriionen zugegen sind, ist $BaSO_4$ durch Sulfate dieser Metalle erheblich verunreinigt. Man muß diese vorher mit Ammoniak ausfällen. Auch wenn viel Alkalisalze oder ein Ueberschuß von $BaCl_2$ zugegen sind, ist $BaSO_4$ durch kleine Mengen davon verunreinigt. Blei, das ebenso wie Ba ein schwer lösliches Sulfat bildet, kann vorher durch H_2S gefällt werden.

Für die Trennung der drei Erdalkalimetalle Ca, Sr, Ba, die ja nach dem allgemeinen Analysengang zusammen durch Ammoniumkarbonat als Karbonate gefällt werden, sind zahlreiche Methoden vorgeschlagen worden. Die Mehrzahl benutzt die verschiedene Löslichkeit der Chloride und Nitrate in Alkohol. $BaCl_2$ ist in Alkohol schwer, $SrCl_2$ und $CaCl_2$ leicht löslich. Von den Nitraten sind die von Ba und Sr schwer, das vom Ca leicht löslich.

Man kann z. B. die Karbonate in HCl lösen und die trockenen Chloride mit Alkohol behandeln, $BaCl_2$ bleibt zurück. $SrCl_2$ und $CaCl_2$ werden in Nitrate verwandelt entweder durch erneutes Ausfällen als Karbonate und Lösen in HNO_3 oder durch wiederholtes Abrauchen mit HNO_3. Behandelt man die Nitrate mit Alkohol, so geht nur $Ca(NO_3)_2$ in Lösung, $Ba(NO_3)_2$ bleibt zurück. An Stelle von reinem Alkohol kann man auch besser bei den Chloriden Alkohol + konzentrierte Salzsäure, bei den Nitraten Alkohol + Aether nehmen. Ba kann man auch zuerst aus der Lösung der Chloride als $BaCrO_4$ abscheiden. Für die quantitative Trennung kommt nach Treadwell nur folgende Methode in Betracht: die trockenen Nitrate werden mit Alkohol + Aether behandelt, nur $Ca(NO_3)_2$ geht in Lösung. Ba wird vom Sr durch Fällung als $BaCrO_4$ durch Ammoniumchromat bei Gegenwart von Essigsäure und Ammoniumacetat getrennt.

Da die Zersetzungsspannungen von Ba-, Sr-, Ca-Salzen an einer Quecksilberkathode genügend weit voneinander entfernt liegen, so kann man durch Elektrolyse bei gleichzeitiger Beobachtung des Kathodenpotentiales eine quantitative Trennung der drei Metalle herbeiführen.

5. Spezielle Chemie. 5a) Chemische Eigenschaften des Metalls. Ueber die chemischen Eigenschaften des metallischen Bariums ist nur wenig bekannt. Sie werden im allgemeinen denen des Calciums und Strontiums entsprechen, doch scheint Barium reaktionsfähiger als Calcium zu sein. An

der Luft wird es leicht oxydiert, Wasser wird lebhaft zersetzt. Auch mit Alkohol reagiert es unter H_2-Entwickelung und Bildung von Alkoholat.

5b) Verbindungen des Bariums.

α) Verbindungen mit Nichtmetallen. Bariumhydrid BaH_2 wird erhalten durch Erhitzen von Ba-Amalgam im Wa serstoffstrom auf etwa 900°. Es schmilzt bei 1200° und destilliert bei 1400°. Die chemischen Eigenschaften entsprechen denen der Sr- und Ca-Verbindung.

Bariumfluorid, BaF_2 wird erhalten durch Lösen von $Ba(OH)_2$ oder $BaCO_3$ in HF, durch Fällung der Lösung eines Ba-Salzes mit einem Alkalifluorid, oder auch beim Zusammenschmelzen von $BaCl_2$ mit NaF und NaCl. BaF_2 ist in Wasser schwer löslich, jedoch leichter als CaF_2. Bei 18° lösen sich 1605 mg im Liter. BaF_2 bildet kleine Kristalle d 4,83 bei 4°. Schmelzpunkt 1280°. Doppelsalze von BaF_2 mit $BaCl_2$, $BaBr_2$ und BaJ_2 sind bekannt, sie bilden sich beim Erhitzen der Komponenten auf 1000°.

Bariumchlorid, $BaCl_2$ kann dargestellt werden durch Einwirkung von Salzsäure auf BaO, $Ba(OH)_2$, $BaCO_3$, BaS. Technisch wird $BaCl_2$ meist aus Schwerspat gewonnen, nach älteren Verfahren durch Reduktion mit Kohle zu BaS, das man dann direkt mit HCl umsetzt, oder man fällt erst mit CO_2 $BaCO_3$ und löst dieses in HCl. Neuere Verfahren bezwecken die Umwandlung des $BaSO_4$ in $BaCl_2$ in einer Operation zu erreichen, etwa durch Zusammenschmelzen mit einem Chlorid ($CaCl_2$ oder $MnCl_2$) und einem Reduktionsmittel (Kohle oder Eisen) z. B.:

$$BaSO_4 + CaCl_2 + 4C = BaCl_2 + CaS + 4CO.$$

Das wasserfreie $BaCl_2$ schmilzt bei 960°. In Berührung mit Wasserdampf wird es dabei zum Teil in BaO und HCl hydrolytisch gespalten. Die erstarrte Schmelze reagiert daher schwach alkalisch. Ihre d ist 3,75 bis 3,9. $BaCl_2$ schmeckt bitter und ist stark giftig. Das wasserfreie Salz ist hygroskopisch. $BaCl_2$ kristallisiert mit 1 und 2 H_2O. Monohydrat $BaCl_2$, H_2O entsteht aus Dihydrat beim Erhitzen auf 60 bis 65° oder beim Behandeln mit Methylalkohol. Bei 100° verliert es alles Wasser. Dihydrat $BaCl_2 . 2H_2O$ kristallisiert bei Zimmertemperatur aus der wässrigen Lösung in rhombischen Tafeln. d 3,05 bis 3,08. $BaCl_2$ ist in Wasser leicht löslich. Bei 20° lösen sich in 100 g H_2O 35,7 g $BaCl_2$.

In Chloriden (HCl, NaCl) ist $BaCl_2$ weniger löslich entsprechend der Zurückdrängung des Dissoziationsgrades. In konzentrierter HCl ist es schwer löslich (Physikalische Eigenschaften der wässrigen $BaCl_2$-Lösungen bei Abegg, Handbuch 2, 2).

In Methylalkohol ist $BaCl_2$ merklich löslich (bei 15,5° 2,18 g $BaCl_2$ in 100 g CH_3OH), in Aethylalkohol schwer.

Die Existenz von Oxychloriden wird in Mischkristallen aus Bariumchlorid und Bariumhydroxyd vermutet.

Bariumsubchlorid, BaCl entsteht durch Einwirkung von Ba auf $BaCl_2$ bei 850° im Vakuum oder durch Elektrolyse von festem $BaCl_2$ bei etwa 400°.

Bariumbromid, $BaBr_2$ wird erhalten aus $Ba(OH)_2$ oder $BaCO_3$ und HBr oder aus BaS und Br unter Schwefelabscheidung. Das wasserfreie Salz schmilzt bei 760°. d 4,79. Es kristallisiert mit 2 oder $1H_2O$. Das Dihydrat $BaBr_2 . 2H_2O$ scheidet sich bei der Kristallisation aus wässrigen Lösungen in Kristallen ab, die als rhombisch oder als monoklin angesehen werden. d 3,852 bei 24°. Bei 75° geht es in das Monohydrat $BaBr_2 . H_2O$ über, das erst oberhalb 100° sein Wasser verliert. $BaBr_2$ ist in Wasser leicht löslich, bei 20° lösen sich 123 g $BaBr_2$ in 100 g H_2O. In Aethyl- und Methylalkohol ist $BaBr_2$ löslich.

In wässriger Lösung setzt sich $BaBr_2$ mit CO_2 und dem Sauerstoff der Luft unter Bildung von $BaCO_3$ und Br um.

$$BaBr_2 + CO_2 + O = BaCO_3 + Br_2.$$

Bariumjodid, BaJ_2 wird erhalten aus $Ba(OH)_2$ oder $BaCO_3$ und HJ oder auch J und einem Reduktionsmittel (P oder SO_2). Das wasserfreie Salz hat die d^{25}_4 5,150. Mit Wasser bildet BaJ_2 Hydrate wahrscheinlich mit 7, 6, 2 und 1 H_2O. Die Beziehungen der einzelnen Hydrate zueinander sind noch nicht genauer untersucht. Beim Erwärmen geben sie allmählich ihr Wasser ab. Bei Gegenwart von Luft spalten sie gleichzeitig J ab, das aus primär gebildeter HJ durch Oxydation entstanden ist. Im H_2- oder CO_2-Strom entsteht kein Jod.

BaJ_2 ist in Wasser sehr leicht löslich, bei 18° sind enthalten in 100 g gesättigter Lösung 66,3 g BaJ_2. In Aethylalkohol ist BaJ_2 leicht löslich.

Bariumtetrajodid, BaJ_4 entspricht der Calciumverbindung, doch scheint es etwas weniger beständig zu sein.

Bariumoxyd, BaO (Aetzbaryt) kann rein erhalten werden aus $Ba(JO_3)_2$ oder $Ba(NO_3)_2$ durch starkes Glühen. Bei niedrigerer Temperatur enthält das Produkt Superoxyd. Die technische Darstellung durch Brennen von $BaCO_3$ macht wegen der hohen Zersetzungstemperatur Schwierigkeiten. Sie gelingt jedoch bei Zusatz von Kohlepulver, weil durch die Bildung von CO der Partialdruck des CO_2 herabgesetzt wird.

BaO erhält man gewöhnlich als amorphes Pulver. d 4,7 bis 5,8. Aus Nitrat kann man bei heftigem Glühen Kristalle bekommen, entweder Würfel oder hexagonale Formen.

Im elektrischen Ofen schmilzt BaO leichter als CaO und SrO. Im Cl_2-Strom geglüht gibt BaO $BaCl_2$ und O_2.

Bariumhydroxyd, $Ba(OH)_2$ entsteht aus BaO und H_2O unter lebhafter Wärmeentwickelung. Es kristallisiert mit 16, 8, 3 und 1 H_2O.

Das Oktohydrat $Ba(OH)_2 . 8H_2O$ erhält man aus wässrigen Lösungen bei der Kristallisation zwischen Zimmertemperatur und 109°. Es kristallisiert tetragonal. d 1,66. Es schmilzt bei 78° in seinem Kristallwasser. Ueber H_2SO_4 und im Vakuum verliert es $7H_2O$ und bildet Monohydrat $Ba(OH)_2 . H_2O$. Trihydrat $Ba(OH)_2 . 3H_2O$ kristallisiert aus siedenden Lösungen, die mehr als 61,5% BaO enthalten.

Wasserfreies Bariumhydroxyd $Ba(OH)_2$ entsteht aus $Ba(OH)_2 . 8H_2O$ durch längeres Erhitzen auf 95°. $Ba(OH)_2$ schmilzt bei 325° und bleibt bis 600° unverändert. Bei höheren Temperaturen spaltet sich H_2O ab. Bei 998° wird der H_2O-Druck gleich 1 Atm.

Bariumhydroxyd ist in Wasser ziemlich leicht löslich. Die Löslichkeit wächst stark mit der Temperatur. Bei 20° lösen sich in 100 g H_2O 3,84 g BaO, bei 80° 90,77 g BaO.

Durch Neutralsalze wird die Löslichkeit erhöht, auch durch $BaCl_2$ und $Ba(NO_3)_2$, obgleich hier das Gegenteil zu erwarten wäre. Wahrscheinlich bilden sich komplexe Kationen. $Ba(OH)_2$ ist in wässriger Lösung weitgehend dissoziiert in $^1/_{64}$ n-Lösung bei 25° zu 93%, also eine starke Base. Die Lösung (Barytwasser) dient als empfindliches Reagenz auf CO_2, mit dem sie sofort schwer lösliches $BaCO_3$ bildet. Bei Abwesenheit von Wasser reagiert wasserfreier Baryt mit CO_2 erst bei Rotglut. Das Monohydrat reagiert dagegen schon bei niederer Temperatur. Mit CS_2 setzt sich Barytwasser bei 100° nach folgender Gleichung um: $CS_2 + 2Ba(OH)_2 = BaCO_3 + Ba(SH)_2 + H_2O$. In wässrigem Alkohol ist $Ba(OH)_2$ schwer löslich.

Bariumsuperoxyd BaO_2 entsteht bei der Einwirkung von Sauerstoff auf BaO bei hoher Temperatur. Die Reaktion ist umkehrbar. Für das Gleichgewicht zwischen den Stoffen BaO_2, BaO und O_2 gelten dieselben Betrachtungen wie für $CaCO_3$, CaO und CO_2. Zu jeder Temperatur gehört ein bestimmter Dissoziationsdruck des Sauerstoffs. Er beträgt bei

525°	20 mm Hg	720°	210 mm
650°	65 „ „	750°	340 „
670	80 „ „	790°	670 „

Zwischen 670° und 720° wird der Sauerstoffdruck gleich seinem Partialdruck in der atmosphärischen Luft (160 mm). Unterhalb der betreffenden Temperatur muß sich aus BaO und Luft BaO_2 bilden. Erhitzt man dieses auf höhere Temperatur und entfernt den abgespaltenen Sauerstoff durch Wegpumpen, so wird wieder BaO zurückgebildet. Man kann so Sauerstoff aus Luft in reiner Form gewinnen. Das Verfahren wurde eine Zeitlang technisch benutzt.

Bariumsuperoxyd wird technisch dargestellt durch Brennen von $BaCO_3$, C und MgO bei 1200°. Die Masse sinkt in dem Ofen herunter und wird durch einen Luftstrom gekühlt, wobei sich dann aus dem entstandenen BaO BaO_2 bildet. Bariumsuperoxyd ist ein weißes Pulver.

Aus BaO_2 und H_2O bildet sich ein Hydrat mit $8H_2O$, daß man auch aus $Ba(OH)_2$ und H_2O_2 erhalten kann. Mit viel H_2O_2 bekommt man eine Verbindung $BaO_2 . H_2O_2$. In Wasser ist BaO_2 schwer löslich. Mit verdünnten Säuren bildet es H_2O_2, mit konzentrierter HCl Sauerstoff, mit konzentrierter H_2SO_4 entwickelt sich ozonhaltiger Sauerstoff. BaO_2 ist ein kräftiges Oxydationsmittel. Aehnlich wie H_2O_2 wirkt es auf andere Oxydationsmittel oder leicht reduzierbare Stoffe ein unter Entwickelung von O_2. Z. B. auf MnO_2 bei Gegenwart von HCl oder auf Ferricyankalium in Berührung mit Wasser (Methoden für Sauerstoffdarstellung), auf Salze der Edelmetalle, wobei die freien Metalle entstehen. Durch Salze von Zn, Cd, Ni, Co und durch Ferrisalze wird aus BaO_2 ein O-Atom abgespalten, es bildet sich Ba-Salz und Metallhydroxyd.

Beim Erhitzen von BaO und Mg soll sich ein Bariumsuboxyd Ba_2O bilden.

Bariumsulfid, BaS wird nach denselben Methoden erhalten wie CaS. Die Reduktion von $BaSO_4$ durch Kohle ist technisch von Bedeutung, da $BaSO_4$ das am häufigsten vorkommende Ba-Mineral und BaS dementsprechend das wichtigste Zwischenprodukt bei der Herstellung von Ba-Verbindungen ist.

Bariumsulfid ist ein in reinem Zustand weißes Pulver. Im elektrischen Ofen kann es geschmolzen werden, reagiert aber bei noch höherer Temperatur mit der Kohle der Elektroden unter Carbidbildung. Mit Wasserdampf gibt BaS beim Glühen $BaSO_4$ und H_2.

In Wasser ist es leicht löslich, jedoch enthält die Lösung wahrscheinlich der Hauptmenge nach durch Hydrolyse entstandenes $Ba(OH)_2$ und $Ba(SH)_2$. Ein Hydrat des BaS mit $6H_2O$ ist in Kristallen erhalten worden.

Bariumsulfid zeigt ebenso wie CaS und SrS namentlich bei Gegenwart kleiner Mengen fremder Bestandteile Phosphoreszenz. An mit Kohle geglühtem Schwerspat wurde Phosphoreszenz zum erstenmal beobachtet.

Bariumsulfhydrat, $Ba(SH)_2$ entsteht beim Einleiten von H_2S in eine Lösung von $Ba(OH)_2$ oder BaS. Es kristal-

lisiert mit $4H_2O$. Die Lösungen spalten leicht H_2S ab.

Bariumpolysulfide. Sicher bekannt sind BaS_3, BaS_4 (mit 1 und $2H_2O$). BaS_5 existiert wahrscheinlich in wässriger Lösung.

Bariumnitrid, Ba_3N_2 entsteht durch Einwirkung von N_2 auf Bariumamalgam bei heller Rotglut als geschmolzene, kristallinische Masse. Mit Wasser bildet es $Ba(OH)_2$ und NH_3. Mit Kohle im N_2-Strom erhitzt entsteht aus Ba_3N_2 Bariumcyanid und -carbid. CO reagiert bei Rotglut mit Ba_3N_2 unter Bildung von BaO und $Ba(CN)_2$.

Metallisches Barium und Ammoniak reagieren je nach der Temperatur in verschiedener Weise miteinander. Bei 280⁰ bildet sich Bariumamid, $Ba(NH_2)_2$ als graue Flüssigkeit, die bei steigender Temperatur erst grün und dann rot wird. Bei 460⁰ siedet sie unter Abspaltung von N_2 und H_2. Bei 650⁰ geht sie in orangegelbes festes Ba_3N_2 über. Läßt man dieses in einer $N_2 + H_2$ Atmosphäre abkühlen, so bildet sich wieder $Ba(NH_2)_2$ zurück. Bei mäßig hohen Temperaturen bis herunter zu 28⁰ reagieren Ba und NH_3 nicht miteinander. Unterhalb 28⁰ bildet sich ein braunroter Körper, der bei — 23⁰ in eine blaue Flüssigkeit übergeht, die als $Ba(NH_3)_6$ Bariumammonium aufgefaßt wird. Oberhalb — 15⁰ zersetzt sie sich und bildet $Ba(NH_2)_2$. An der Luft entzündet sie sich, Wasser wird lebhaft zersetzt, mit Sauerstoff reagiert sie unter Bildung von BaO_2 und $Ba(NO_2)_2$.

Bariumphosphid, Ba_3P_2 wird ebenso wie Ca_3P_2 dargestellt. Es zersetzt lebhaft H_2O.

Bariumarsenid, Ba_3As_2 entsteht durch Reduktion von Bariumarsenat mit Kohle im elektrischen Ofen. Es ist reaktionsfähiger als die entsprechenden Ca- und Sr-Verbindungen. Im Sauerstoff entzündet es sich bei 300⁰. Es reagiert lebhaft mit Brom.

Bariumcarbid BaC_2 wird analog wie CaC_2 aus BaO und Kohle im elektrischen Ofen enthalten. d 3,75. Sein chemisches Verhalten entspricht dem von CaC_2, so liefert es mit H_2O Acetylen. Nur mit N_2 reagiert es unter Bildung von Bariumcyanid $Ba(CN)_2$ und Bariumcyanamid $BaCN_2$.

Bariumcarbonyl, $Ba(CO)_2$ ist als gelber Körper beim Einleiten von CO in eine Lösung von Bariumammonium ($Ba(NH_3)_6$) in flüssigem NH_3 erhalten worden.

Bariumsilicid, $BaSi_2$; Bariumborid, BaB_6.

5β) Salze mit Sauerstoffsäuren. Durch Einwirkung von Cl_2 auf kristallisiertes Bariumhydroxyd bildet sich ein dem Chlorkalk ähnliches Produkt, das aller Wahrscheinlichkeit nach Bariumhypochlorit, $Ba(OCl)_2$ enthält; es wandelt sich allmählich in $Ba(ClO_3)_2$ und $BaCl_2$ um. Rein ist $Ba(OCl)_2$ noch nicht erhalten worden.

Bariumchlorat, $Ba(ClO_3)_2$ wird dargestellt durch Einleiten von Cl_2 in Barytwasser, besonders in der Wärme, ferner aus $Ba(OH)_2$ und $HClO_3$, oder durch Kochen von $BaCO_3$ mit einer Lösung von $NH_4.ClO_3$ in Alkohol.

Bariumchlorat kristallisiert monoklin mit $1H_2O$. d 2,99 oder 3,18. $Ba(ClO_3)_2$ gibt beim Erhitzen auf Temperaturen von 300⁰ und darüber Sauerstoff ab. Bei konstanter Temperatur ist die Zersetzungsgeschwindigkeit erst klein, erreicht ein Maximum und wird endlich gleich Null, wenn etwa 11% Sauerstoff abgegeben sind. Es bildet sich außer O_2 noch $Ba(ClO_4)_2$ und $BaCl_2$, annähernd der Gleichung entsprechend:

$$2Ba(ClO_3)_2 = Ba(ClO_4)_2 + BaCl_2 + 2O_2.$$

$Ba(ClO_3)_2$ ist in Wasser ziemlich leicht löslich, bei 20⁰ sind in 100 g Lösung 25,26 g $Ba(ClO_3)_2$ enthalten. $Ba(ClO_3)_2$ wird in der Feuerwerkerei für Grünfeuer verwandt.

Bariumperchlorat, $Ba(ClO_4)_2$ entsteht außer wie eben erwähnt aus $Ba(ClO_3)_2$ aus $Ba(OH)_2$ und $HClO_4$. Das wasserfreie Salz schmilzt bei 505⁰, die Zersetzung in $BaCl_2$ und O_2 beginnt bei 460⁰. Es ist auch als Tri- und als Monohydrat bekannt.

Bariumhypobromit, $Ba(OBr)_2$ ist nur in Lösung bekannt, diese entsteht aus Brom und $Ba(OH)_2$. Sie oxydiert NH_3 zu H_2O und N_2, wird daher zur gasvolumetrischen Bestimmung von NH_3 benutzt.

Bariumbromat, $Ba(BrO_3)_2$ wird erhalten durch Auflösen von Bariumacetat in einer siedenden konzentrierten Lösung von $KBrO_3$. Es scheiden sich beim Abkühlen Säulen von $Ba(BrO_3)_2.H_2O$ ab. Das H_2O wird erst bei höherer Temperatur abgegeben. Bei 300⁰ zerfällt das Salz in Brom und Bariumperbromat, $Ba(ClO_4)_2$, ein weißes Pulver.

Bariumjodat, $Ba(JO_3)_2$ wird dargestellt aus $Ba(OH)_2$ und HJO_3. Es kristallisiert mit $1H_2O$ in monoklinen Formen, isomorph mit $Ba(ClO_3)_2$ und $Ba(BrO_3)_2$. In Wasser ist es wenig löslich. $Ba(JO_3)_2$ gibt beim Erhitzen J_2 und O_2 ab; es entsteht eine Verbindung von der Formel $Ba_5J_2O_{12}$.

Bariumsulfit, $BaSO_3$ wird ebenso wie $CaSO_3$ erhalten. Es ist dimorph. In Wasser und auch in Zuckerlösungen ist es schwer löslich.

Bariumthiosulfat, BaS_2O_3 entsteht bei der Oxydation von BaS an der Luft, rein beim Zusammenbringen von $Na_2S_2O_3$ und $BaCl_2$-Lösungen. Es kristallisiert mit $1H_2O$. In Wasser ist es ziemlich schwer löslich. Beim Erhitzen zersetzt es sich in BaS, S und $BaSO_4$.

Bariumsulfat, $BaSO_4$ kommt in der Natur als Schwerspat in rhombischen Kri-

stallen vor. d 4,487. $BaSO_4$ bildet sich auf trockenem Wege aus BaO und SO_3 oder H_2SO_4 und aus BaO_2 und SO_2. Die erste Reaktion erfolgt nur bei Gegenwart von H_2O-Spuren, wird aber auch dann verhindert durch Aether, Methyl- und Aethylalkohol. Auf nassem Wege bildet sich $BaSO_4$ immer als sehr schwer löslicher Niederschlag (amorph oder kristallinisch), wenn $Ba^{..}$- und $SO_4^{''}$-Ionen zusammentreffen. Durch sehr langsame Fällung oder durch langes Erhitzen von frisch gefälltem $BaSO_4$ zusammen mit Salzsäure oder $NaHCO_3$-Lösung im Rohr auf 250° kann man deutliche Kristalle erhalten.

Schwerspat zeigt geringe elektrische Leitfähigkeit. Durch Erhitzen wird $BaSO_4$ erst oberhalb 1400° zersetzt. Im elektrischen Lichtbogen ist es flüchtig. Durch Reduktionsmittel H_2, Kohle, CO, Fe, Zn wird $BaSO_4$ zu BaS reduziert. Durch langes Behandeln mit HCl kann $BaSO_4$ in $BaCl_2$ umgewandelt werden. Beim Zusammenschmelzen mit Alkalikarbonaten (Na_2CO_3, K_2CO_3, wegen des niedrigeren Schmelzpunktes nimmt man vielfach ein Gemisch von beiden) setzt sich $BaSO_4$ praktisch vollständig zu $BaCO_3$ um (Aufschließungsmethode). Das Gleichgewicht in dem System $BaSO_4 + K_2CO_3 \rightleftarrows BaCO_3 + K_2SO_4$ liegt in der Schmelze stark nach der rechten Seite. Es genügt ein geringer Ueberschuß von K_2CO_3, um praktisch vollständige Bildung von $BaCO_3$ zu erreichen. Der in der Praxis angewandte große Ueberschuß ist erforderlich, damit beim Lösen der Schmelze in Wasser der Vorgang nicht rückläufig wird. Auch in wässriger Lösung erfolgt zum Teil Umsetzung zwischen $BaSO_4$ und Alkalikarbonaten.

$BaSO_4$ ist in Wasser außerordentlich schwer löslich. Bei 18° lösen sich 2,30 mg im Liter. Bei feinkörnigem Material ist die Löslichkeit größer, bis zu 4,1 mg. In den Lösungen von Neutralsalzen, wenn es nicht Ba-Salze oder Sulfate sind, und in HCl und HNO_3 ist die Löslichkeit von $BaSO_4$ erhöht. In konzentrierter H_2SO_4 ist es leicht löslich, zu 10 bis 12%. Es bildet sich saures Sulfat $BaH_2(SO_4)_2$, das auch in fester Form erhalten werden kann. Auf die große Adsorptionsfähigkeit des ausfallenden $BaSO_4$ wurde schon hingewiesen (Analytische Chemie des Ba). Das gerade $Fe^{...}$ (und auch $Al^{...}$ und $Cr^{...}$) in so großer Menge als Ferrisulfat usw. mit in den Niederschlag hineingeht, erklärt man durch die Annahme der Bildung eines komplexen Anions $Fe(SO_4)_2''$ usw. Beim Glühen spaltet sich das Ferrisalz in Fe_2O_3 und SO_3. Das Gewicht des Niederschlags wird zu klein.

Bariumpolythionate sind bekannt. Sie sind alle in Wasser sehr viel leichter löslich als $BaSO_4$. Leicht zugänglich ist das gut kristallisierende Bariumdithionat ($BaS_2O_6 \cdot 2H_2O$). Man erhält es durch Umsetzung mit $Ba(OH)_2$ mit einer Lösung von Mangandithionat, die aus MnO_2 und SO_2 gewonnen wird.

Bariumnitrit, $Ba(NO_2)_2$ wird dargestellt durch schwaches Glühen von $Ba(NO_3)_2$, aus $AgNO_2$ und $BaCl_2$, oder durch Umsetzung von $BaCl_2$ mit $NaNO_2$ beim Behandeln mit konzentrierter $NaNO_2$-Lösung und nachfolgender fraktionierter Kristallisation zur Trennung von $Ba(NO_2)_2$ und $NaNO_2$.

$Ba(NO_2)_2$ kristallisiert hexagonal mit $1H_2O$; es ist auch in wasserfreien Kristallen erhalten worden. In Wasser ist es leicht löslich, in 100 ccm H_2O lösen sich bei 20° 63 g $Ba(NO_2)_2$. In hochprozentigem Alkohol ist es unlöslich.

Bariumnitrat, $Ba(NO_3)_2$ kommt in der Natur als Barytsalpeter vor. Es wird dargestellt aus $Ba(OH)_2$, oder $BaCO_3$, oder auch BaS und HNO_3. Da es in Wasser ziemlich wenig löslich ist, und die Löslichkeit noch durch überschüssige NO_3'-Ionen vermindert wird, kann man $Ba(NO_3)_2$ durch Umsetzung eines Ba-Salzes mit einem Alkalinitrat oder HNO_3 aus wässriger Lösung erhalten. $Ba(NO_3)_2$ kristallisiert bei gewöhnlicher Temperatur ohne Kristallwasser in Würfeloktoedern. d 3,23. Zwischen 0 und 12° sind Kristalle mit $2H_2O$ erhalten worden.

$Ba(NO_3)_2$ schmilzt bei 593°. Beim Glühen zersetzt es sich, je nach den äußeren Umständen unter Bildung verschiedener Produkte Ba_3O_4, O_2, N_2, N_2O_3. Bei 20° lösen 100 g H_2O 9,2 g $Ba(NO_3)_2$. $Ba(NO_3)_2$ wird in der Feuerwerkerei und zur Herstellung von Sprengstoffen verwandt.

Bariumhypophosphit, $Ba(H_2PO_2)_2$ entsteht bei der Darstellung von PH_3 durch Kochen von Phosphor mit $Ba(OH)_2$. Es kristallisiert mit $1H_2O$ oder aus sauren Lösungen wasserfrei. Beim Glühen liefert es Bariumpyro- und -metaphosphat und selbstentzündlichen Phosphorwasserstoff. In Wasser ist $Ba(H_2PO_2)_2$ leicht löslich, aus den Lösungen wird es mit Alkohol gefällt.

Bariumhydrophosphit, $BaHPO_3$ gibt beim Glühen H_2 und Phosphor ab.

Bariumdihydrophosphit, $Ba(H_2PO_3)_2$ und saure Salze davon $2(BaHPO_3) \cdot H_3PO_3 \cdot 8H_2O$ und $2(BaHPO_3)_2 \cdot 3H_3PO_3 \cdot 2H_2O$ geben beim Erhitzen erst Wasser ab, dann H_2 und Phosphorwasserstoff, zurück bleibt ein Gemisch von Pyro- und Metaphosphaten.

Bariumorthophosphate:

Bariumdihydrophosphat, primäres Bariumphosphat, $Ba(H_2PO_4)_2$.

Bariummonohydrophosphat, sekundäres Bariumphosphat, $BaHPO_4$.

Bariumanhydrophosphat, tertiäres Bariumphosphat, $Ba_3(PO_4)_2$.

Alle drei Salze sind bekannt. Für ihre Löslichkeit in Wasser und Säuren gilt dasselbe wie bei den Calciumphosphaten. Sie werden ebenfalls hydrolytisch gespalten, z. B. zerfällt primäres Phosphat in schwerer lösliches sekundäres und freie Phosphorsäure.

$Ba(H_2PO_4)_2$ kristallisiert triklin mit $1H_2O$ aus sauren Lösungen aus.

$BaHPO_4$ entsteht beim Fällen einer neutralen Ba-Salzlösung mit Na_2HPO_4, als amorpher aber dann kristallinisch werdender Niederschlag. In Wasser ist es ziemlich schwer löslich, leicht in verdünnten Säuren, auch H_2CO_3 und H_2SO_3, dann in Ammoniumsalzen, namentlich bernsteinsaurem Ammonium. In konzentrierter HNO_3 ist es schwer löslich.

$Ba_3(PO_4)_2$ fällt aus Ba-Salzlösungen mit tertiären Alkaliphosphaten oder sekundären bei Gegenwart von Ammoniak. Es kristallisiert mit $1H_2O$.

Von Ba-Salzen der Pyrophosphorsäure sind verschiedene dargestellt worden. $Ba_2P_2O_7$ gibt beim Glühen im H_2-Strom Phosphorwasserstoff.

Bariummonohydroarsenit, $BaHAsO_3$. Bariumarsenate sind alle drei bekannt.

Bariumsulfarsenite, Verbindungen von BaS, As_2S_3 und H_2O sind verschiedene bekannt.

Bariumkarbonat, $BaCO_3$ kommt in der Natur als Witherit vor. Es kann nach den gleichen Methoden wie $SrCO_3$ gewonnen werden. Witherit kristallisiert rhombisch, isomorph mit Aragonit und Strontianit. d. von Witherit 4,377, von gefälltem amorphen $BaCO_3$ 4,275. $BaCO_3$ schmilzt bei 795°. Die Abspaltung von CO_2 beim Erhitzen erfolgt viel weniger leicht als beim $CaCO_3$, da die CO_2-Drucke bei gleichen Temperaturen viel niedriger liegen. Erst bei etwa 1350° wird der CO_2-Druck über $BaCO_3$ gleich 1 Atm. $BaCO_3$ setzt sich mit Lösungen von Alkalisulfaten und Oxalaten zum Teil um unter Bildung von Bariumsulfat oder Bariumoxalat.

In Wasser ist $BaCO_3$ sehr schwer löslich, aber nicht so schwer wie $CaCO_3$ und $SrCO_3$. Bei 18° lösen sich 24 mg im Liter. In Lösungen von NH_4-Salzen und in solchen von K_2CO_3, Na_2SO_4, $MgSO_4$ u. a. ist die Löslichkeit von $BaCO_3$ erhöht, ebenso in solchen, die CO_2 enthalten, hier aus den gleichen Gründen wie beim $CaCO_3$, es bildet sich Bariumbikarbonat $Ba(HCO_3)_2$. Durch Vermischen von eiskalten Lösungen von $BaCl_2$ mit solchen von NH_4HCO_3 hat man Niederschläge von der ungefähren Zusammensetzung $Ba(HCO_3)_2$ erhalten. $BaCO_3$ ist in wässriger Lösung hydrolytisch gespalten, diese reagiert ganz schwach alkalisch. Eine Suspension von $BaCO_3$ in Wasser wird als alkalisches Fällungsmittel benutzt, dessen Alkalität niemals über einen bestimmten kleinen Wert herausgehen kann, der aber immer erhalten bleibt, solange noch festes $BaCO_3$ zugegen ist, da die verbrauchten Hydroxylionen sofort nachgeliefert werden.

$$BaCO_3 + 2H_2O = Ba(OH)_2 + \underbrace{H_2CO_3}_{H_2O + CO_2}$$

Da CO_2 entweicht, kann die Hydrolyse immer weiter gehen. Man kann so schwach basische Metallhydroxyde $Al(OH)_3$, $Fe(OH)_3$, $Cr(OH)_3$ ausfällen, während stärker basische $Mn(OH)_2$, $Zn(OH)_2$ nicht gefällt werden.

Bariumperkarbonat, $BaCO_4$, entsteht durch Einwirkung von CO_2 auf BaO_2. Es ist ein schwach gelbliches Pulver, das sich bei gewöhnlicher Temperatur langsam, beim Erwärmen schnell zersetzt. In Wasser ist es schwer löslich. Durch Säuren wird es sofort gespalten, es bildet sich H_2O_2, CO_2 und das Ba-Salz der Säure.

Bariumsilikate. In der Natur kommen Bariumsilikate nur zusammen mit den Silikaten anderer Metalle vor. Ein Bariummetasilikat mit $1H_2O$, $BaSiO_3 . H_2O$ und verschiedene Silikate wechselnder Zusammensetzung sind künstlich dargestellt worden.

Bariumborate. Bariummetaborat $Ba(BO_2)_2$ ist wasserfrei und mit $1H_2O$ bekannt. In der Schmelze von BaO und B_2O_3 existieren folgende Verbindungen: $3BaO . B_2O_3$; $2BaO . B_2O_3$; $BaO . B_2O_3 = Ba(BO_2)_2$; $BaO . 2B_2O_3 = BaB_4O_7$. Aus Lösungen von Bariumsalzen fallen mit Boraxlösungen Niederschläge wechselnder Zusammensetzung.

Bariumacetat $Ba(C_2H_3O_2)_2$ kristallisiert mit $3H_2O$ bei 0° und mit $1H_2O$ oberhalb 10°. Bei 21,6° lösen sich in 100 g H_2O 72,8 g $Ba(C_2H_3O_2)_2$.

Bariumoxalat, BaC_2O_4 bildet Hydrate mit 1/2, 2 und 3 1/2 H_2O. In einer bei 18° gesättigten Lösung des Dihydrats (stabil zwischen 0° und 40°) sind in 1 Liter 85,1 mg BaC_2O_4 enthalten.

6. Thermochemie. Bildungs- und Lösungswärmen der wichtigsten Bariumverbindungen (vgl. die Vorbemerkungen zur Thermochemie des Calciums):

	Bildungswärme	Lösungswärme
Bariumchlorid $BaCl_2$	197,08	1,92
Bariumbromid $BaBr_2$	179,82	4,98
Bariumjodid BaJ_2	149,90	10,30
Bariumoxyd BaO	125,86	25,64
Bariumsuperoxyd BaO_2	144,22	
Bariumsulfid BaS	102,5	
Bariumchlorat $Ba(ClO_3)_2$	175,2	—6,7
Bariumsulfat $BaSO_4$	340	
Bariumnitrit $Ba(NO_2)_2$	179,6	—5,7
Bariumnitrat $Ba(NO_3)_2$	228	—9,3
Bariumkarbonat $BaCO_3$	285	

7. Photochemie. Flüchtige Ba-Verbindungen färben die Bunsenflamme gelbgrün. Ein Verzeichnis der im Bogen- und Funkenspektrum gemessenen Linien findet sich in Fehlings Handwörterbuch Band 6, Artikel: Spektralanalyse. Im Bunsenbrenner beobachtet man in erster Linie das Spektrum des Oxyds, die der Halogenverbindungen, wenn man sie anwendet, nur vorübergehend. Will man diese dauernd haben, so muß man HCl-, HBr- oder J-Dämpfe einführen. Das gewöhnliche Bunsenflammen-, also in erster Linie Oxyd-Spektrum zeigt eine große Zahl intensiver Banden im Grün, einige schwächere orangegelbe und ein blaues Band. Nach Treadwell sind die Wellenlängen folgende: Orangegelb (654,0 $\mu\mu$, 629,8 $\mu\mu$), (624,0 $\mu\mu$ 617,9 $\mu\mu$, 610,9 $\mu\mu$, 603,2 $\mu\mu$). Gelb: 582,5 $\mu\mu$ gelbes Tripelband (576,9 $\mu\mu$, 572,0 $\mu\mu$, 564,8 $\mu\mu$). Grün 553,5 $\mu\mu$ (rührt vom Metall selbst her), 534,7, $\mu\mu$ 524,3 $\mu\mu$, 513,7, 500,0 $\mu\mu$. Blau 484,7 $\mu\mu$.

Die Phosphoreszenz des BaS wurde schon erwähnt. BaO reagiert mit Chlorwasserstoff unter Ausstrahlung eines roten Lichtes.

8. Kolloidchemie des Bariums zusammen mit der des Calciums und des Strontiums. Sehr stabile kolloidale Lösungen von großer Homogenität und kleiner Teilchengröße der drei Metalle selbst sind durch oszillatorische Entladungen in Propylalkohol und Isobutylalkohol erhalten worden. Die Farbe der Lösungen im Isobutylalkohol war im durchfallenden Licht bei Ca und Sr schwarzbraun, bei Ba rotbraun, im reflektierten Licht bei Ca und Sr schwarz, bei Ba grau. Einige der in Wasser schwer löslichen Salze von Ca, Sr und Ba kann man in Form gallertartiger Niederschläge erhalten, wenn man zu den Lösungen der Oxyde (CaO, SrO, BaO) in Methylalkohol die betreffenden Fällungsmittel gibt. So sind die Sulfate, Phosphate und Oxalate mit Hilfe der freien Säuren erhalten worden. Beim Einleiten von CO_2 in die methylalkoholische CaO- und BaO-Lösung entstehen klare viscose Flüssigkeiten, die beim Einengen zu einer Gallerte erstarren. Solange das kolloidale $BaCO_3$ noch Methylalkohol enthält, bildet es ein reversibles Kolloid. Kolloidales $BaSO_4$ ist auch aus H_2SO_4 und Ba-Aethylat in Glycerinlösung, und aus $MnSO_4$ und Ba-Rhodanat in Agar-Agar-Lösung dargestellt worden. Von CaF_2 sind haltbare kolloidale Lösungen bekannt.

Literatur. *O. Sackur, Barium, In Abeggs Handbuch der anorganischen Chemie, Bd. II, 2, Leipzig 1905. — Fr. Ephraim, Barium, In Gmelin-Krauts Handbuch der anorganischen Chemie, Bd. II, Heidelberg 1909.*

F. Flade.

f) Zink.

Zn. Atomgewicht 65,37.

1. Vorkommen. 2. Geschichtliches. 3. Darstellung. 4. Verwendung. 5. Physikalische Eigenschaften und Konstanten. 6. Elektrochemie. 7. Nachweis und quantitative Bestimmung. 8. Spezielle Chemie: a) Verhalten gegen Säuren, Basen, Salze, Gase usw.; b) Einfache Salze und Verbindungen; c) Basische Salze; d) Additionsverbindungen; e) Doppel- und Komplexsalze. 9. Kolloidchemie.

1. Vorkommen. Das Zink (Atomgewicht Zn = 65,37) tritt in der Natur in gediegenem Zustande nur äußerst selten auf (Brunswick bei Melbourne in Australien), in Form von Erzen ist es fast auf der ganzen Erde verbreitet, zum Teil in sehr ergiebigen Lagern. Die wichtigsten Zinkerze sind Zinkblende (ZnS), Galmei ($ZnCO_3$), Kieselzinkerz ($Zn_2SiO_4.H_2O$), Rotzinkerz (ZnO) und Franklinit $[3(FeZn)O + (FeMn)_2O_3]$; in neuerer Zeit haben für die Zinkgewinnung auch zinkhaltige Pyrite und sulfidische Bleizink-Mischerze größere Bedeutung erlangt. Die Hauptproduktionsländer für Zink sind Deutschland (Oberschlesien und Rheinland), Belgien und die Vereinigten Staaten von Amerika. Von Pflanzen wird Zink auf zinkhaltigem Boden oft in nicht unbeträchtlichen Mengen aufgenommen, auch im tierischen Organismus ist es gefunden worden.

2. Geschichtliches. Galmei und Zinkblende sowie Zinklegierungen (Messing), nicht aber reines metallisches Zink waren schon im Altertum bekannt. Zinkmetall gelangte erst um 1600 aus dem Orient nach Europa, und erst im 18. Jahrhundert begann man hier mit seiner fabrikmäßigen Darstellung. Das Wort Zink wird zuerst von Basilius Valentinus (15. Jahrhundert), dann von Paracelsus (16. Jahrhundert) gebraucht.

3. Darstellung. Die hüttenmännische Gewinnung des Zinks beruht auf der Reduzierbarkeit von Zinkoxyd durch Kohle. Blende muß vor der Reduktion durch sorgfältiges Rösten, Galmei durch Brennen in Oxyd übergeführt werden, bei Silikaten wird zur Bindung der Kieselsäure CaO zugeschlagen. Das reduzierte Zink destilliert bei Weißglut; die Dämpfe kondensieren sich in den Vorlagen zu flüssigem Metall; bei zu niederer Temperatur, also namentlich bei Beginn der Destillation entsteht Zinkstaub, ein Gemenge von pulverförmigem Zink und Zinkoxyd. Fast alles Zink wird gegenwärtig auf thermischem Wege dargestellt; die zahlreichen Versuche, das Metall durch Elektrolyse von Schmelzflüssen (es kommt hier hauptsächlich $ZnCl_2$ in Frage) und wässerigen Lösungen (namentlich Chlorid-, aber auch Sulfat- und alkalische Zinkatlösungen) zu gewinnen, haben infolge erheblicher technischer und wirtschaftlicher Schwierigkeiten für die Darstellung im großen

noch keine allgemeinere Bedeutung erlangt. Diese Schwierigkeiten bestehen bei der Elektrolyse wässeriger Lösungen namentlich in der richtigen Vorbehandlung der Erze, der erforderlichen hohen Betriebsspannung und der Neigung des Zinks zu Schwammbildung; ihre schließliche Überwindung erscheint jedoch nicht so aussichtslos, wie vielfach angenommen worden ist. Die zur Elektrolyse verwendeten Zinksalzlösungen werden aus den gerösteten Erzen durch Behandlung mit Säuren oder Salzlösungen dargestellt und durch geeignete Zusätze von fremden Metallen befreit. Um ein dichtes, festes Metall zu erzielen, dürfen die Lösungen nicht zu viel $H^{\cdot}$-Ionen enthalten, da die sonst eintretende starke Wasserstoffentwicklung zu Schwammbildung Veranlassung gibt; man hält deshalb die Lösungen annähernd neutral. Sehr zu statten kommt hierbei auch die erhebliche Überspannung (ca. 0,7 Volt), die der Wasserstoff zu seiner Abscheidung an Zinkkathoden bedarf. Alkalische Zinkatlösungen bieten, da in ihnen auch die $Zn^{\cdot\cdot}$-Ionen nur in sehr geringer Konzentration vorhanden sind, keinen Vorteil. Das Elektrolytzink ist ziemlich rein, das im Hüttenbetrieb gewonnene bedarf meist noch einer besonderen Reinigung, die durch Umschmelzen und wiederholte Destillation oder auch durch Elektrolyse erfolgen kann. Durch mehrmalige elektrolytische Raffination, Schmelzen mit NH_4Cl und Destillation im Vakuum erhält man schließlich ein Metall, das auf 100000 Teile Zink höchstens noch 1 Teil Verunreinigungen enthält.

4. Verwendung. Das Zink und seine Verbindungen finden in Laboratorium und Technik wie auch im gewöhnlichen Leben eine außerordentlich ausgedehnte und vielseitige Verwendung. In Form von Blech benutzt man es zur Bedachung, als Schutzbeschlag für Holzteile und zur Herstellung der verschiedenartigsten Gebrauchsgegenstände; der dünne Bezug von basischem Salz, mit dem sich das Zink an der Luft bezieht, schützt es in wirksamster Weise vor weiterem Angriff. Sein niederer Schmelzpunkt und sein verhältnismäßig niederer Preis lassen es in vielen Fällen vor Messing, Bronze und Eisen zu Gießereizwecken geeignet erscheinen. Auch in der Galvanostegie hat es rasch erhebliche Bedeutung erlangt; ein dünner, elektrolytisch auf Eisen erzeugter Zinküberzug stellt einen ausgezeichneten Rostschutz dar. Seiner stark elektropositiven Eigenschaft wegen wird es von jeher als Lösungselektrode in galvanischen Elementen benutzt. Wichtig sind ganz besonders auch die Legierungen des Zinks mit anderen Metallen: mit Kupfer bildet es das von alters her bekannte Messing, Tombak, Mannheimer Gold usw., mit Kupfer und Nickel das Neusilber, mit Kupfer und Zinn die verschiedenen Bronzen. Es dient ferner in den Bleihütten zur Entsilberung des Bleis, im graphischen Gewerbe zur Herstellung von Druckklischees (Zinkographie, Zinkhochätzung). Zinkstaub wird als Anstrichfarbe (Zinkgrau), besonders für Eisen verwendet. Einen wertvollen Oelfarbenanstrich stellt das Zinkoxyd (Zinkweiß) dar; dem Bleiweiß an Deckkraft nicht nachstehend, ist es diesem namentlich aus hygienischen Gründen vorzuziehen. Auch Zinksulfid für sich allein oder als Gemisch mit $BaSO_4$ (Lithopone) wird als Farbe benutzt. Von den Salzen haben hauptsächlich das Chlorid und Sulfat auf den verschiedensten technischen Gebieten und infolge ihrer desinfizierenden und adstringierenden Eigenschaften auch in der Heilkunde ein ausgedehntes Anwendungsgebiet gefunden. Im Laboratorium benutzt man Zink zur Erzeugung von Wasserstoff, als kräftiges Reduktionsmittel (besonders in Form von Zinkstaub) bei organischen Arbeiten, zu analytischen Zwecken und mancherlei Synthesen mittels metallorganischer Verbindungen.

5. Physikalische Eigenschaften und Konstanten. Das metallische Zn ist von bläulichweißer Farbe und besitzt an frischer Bruchfläche starken Metallglanz. Es erstarrt aus dem Schmelzfluß mit blättrig- oder körnig-kristallinischem Gefüge. Man kann es leicht auch in wohlausgebildeten Kristallen erhalten; und zwar kann es sowohl hexagonal als auch regulär kristallisieren, es ist also polymorph. Beim Walzen verschwindet die Kristallstruktur, Erhitzen über 150° stellt sie wieder her.

Bei gewöhnlicher Temperatur ziemlich spröde, erlangt es beim Erhitzen auf 100—150° völlige Dehnbarkeit, so daß es sich zu sehr dünnen Blechen auswalzen und zu Draht ausziehen läßt; oberhalb 200° wird es jedoch, indem es reine Kristallstruktur annimmt, wieder so spröde, daß man es pulvern kann. Das spezifische Gewicht schwankt je nach der Art des Erstarrens und der Vorbehandlung des Metalls zwischen 6,9—7,2; für ungepreßtes Metall kann man $d^{2}{}_{4}{}^{0}$ zu 6,9225 annehmen. Geschmolzenes Zn ist schwerer als festes, beim Schmelzpunkt beträgt der Unterschied 2‰.

Der Schmelzpunkt liegt bei 419°, der Siedepunkt bei 930°. Im Vakuum tritt schon bei 184° Verdampfung ein.

Die spezifische Wärme ist oft bestimmt worden, es seien hier nur die von Behn gefundenen Zahlen angeführt: Zwischen 100° und 18° 0,094; zwischen + 18° und —79° 0,0893; zwischen —79° und —186° 0,0798.

Die Schmelzwärme wurde zu 28,33 g-cal. pro g, die Verdampfungswärme des festen Zn zu 27 g-cal. pro g gefunden.

Der lineare Ausdehnungskoeffizient beträgt $2{,}91 . 10^{-5}$, der kubische Ausdehnungskoeffizient zwischen 0 und 40° $8{,}9 . 10^{-5}$ pro 1°.

Für die absolute Wärmeleitfähigkeit bei 0° wurde der Wert 0,3056 (cm, g, sec, 1°) ermittelt bei 18° 0,2653; bei 100° 0,2619.

Die Leitfähigkeit für Elektrizität beträgt im Vergleich zu Ag = 100 bei 0° 29,02; in reziproken Ohm ausgedrückt beträgt die spezifische Leitfähigkeit pro cm-Würfel bei 18° $16{,}51 . 10^4$, bei 100° $12{,}59 . 10^4$.

Das elektrochemische Aequivalent beträgt 0,3386 mg pro Coulomb, 1,219 g pro Ampère-Stunde.

Zink ist, wie Dampfdruckbestimmungen ergaben, in dampfförmigem Zustande einatomig; auch in Quecksilberlösung besteht es schon bei gewöhnlicher Temperatur aus einatomigen Molekeln.

6. Elektrochemie. Es gibt nur eine Reihe von Zinksalzen, Zn ist immer zweiwertig. Wohl existiert auch ein Zinkperoxyd ZnO_2, dieses ist aber ein Derivat von H_2O_2, enthält also ebenfalls nur zweiwertiges Zn; die sonst noch in der Literatur beschriebenen Zinkperoxyde wie Zn_4O_7, Zn_3O_5 usw. sind höchstwahrscheinlich Gemische von ZnO_2 und ZnO. Zur Abscheidung von 1 g-Atom Zn aus der wässerigen Lösung eines Zinksalzes sind zwei elektrochemische Elektrizitätseinheiten, d. h. 2 . 96540 Coulomb erforderlich; das Kation $Zn^{\cdot\cdot}$ hat also, wenn wir sein Molekulargewicht mit dem Atomgewicht des Zn identifizieren, die Elektrovalenz 2.

In Lösung sind die Zinksalze ziemlich stark dissoziiert, doch ist man über die Art der Ionen noch nicht genügend unterrichtet, da die Salze Neigung zur Selbstkomplexbildung besitzen, so daß, wenigstens in konzentrierten Lösungen, außer den einfachen Ionen mindestens noch ein komplexes Anion vorhanden ist; dadurch werden natürlich auch die aus Leitfähigkeits- oder Gefrierpunktsmessungen berechneten Dissoziationsgrade unsicher und verlieren ihre einfache Bedeutung.

Auf Selbstkomplexbildung ist auch zurückzuführen, daß die Ueberführungszahl des Zn mit wachsender Verdünnung der Lösungen stark zunimmt. In konzentrierten Lösungen wird sogar ein negativer Wert erhalten, ein deutlicher Beweis, daß hier das Zn in großen Mengen in Form komplexer Anionen zur Anode wandert. In der folgenden Zusammenstellung bedeutet n die Ueberführungszahl des Anions bei verschiedenen Verdünnungen der Zinksalze (v = Liter pro Mol).

	Chlorid		Bromid	Jodid
v	0,28	200—800	200—800	200—800
n	1,241	0,603	0,600	0,589

	Sulfat		
v	0,4	0,65	200—750
n	0,778	0,760	0,664

Man darf annehmen, daß, wenigstens bei den Haloidsalzen, die für starke Verdünnungen gefundenen Zahlen Grenzwerte darstellen, in diesen Lösungen also Komplexe nicht mehr vorhanden sind.

Daraus ergibt sich, wenn man die Beweglichkeit des Chlorions bei 18° $v_{Cl'} = 65{,}5$ setzt, für die Beweglichkeit des $Zn^{\cdot\cdot}$-Ions bei dieser Temperatur $u_{\frac{1}{2}Zn^{\cdot\cdot}} = \frac{0{,}397}{603} . 65{,}5 =$ 43,1. Bei Bromid und Jodid berechnet sich entsprechend 45. Kohlrausch nimmt $u_{\frac{1}{2}Zn^{\cdot\cdot}} = 46$ an.

Damit lassen sich nun auch die Leitfähigkeiten der Zinksalze bei unendlicher Verdünnung, die aus den Leitfähigkeiten bendlicher Verdünnung nicht abgeleitet werden können, berechnen; es würde also z. B. für eine Zinkchloridlösung $\Lambda_\infty = u_{\frac{1}{2}Zn^{\cdot\cdot}} + v_{Cl'} = 111{,}5$ zu setzen sein.

Auf Komplexbildung der Zinksalze in wässeriger Lösung deuten auch die Ergebnisse von Potentialmessungen hin. Der Potentialsprung, den Zn gegen die wässerige Lösung seiner Salze zeigt, beträgt, auf die Normal-Quecksilberelektrode bezogen, wenn v die Konzentration der Lösung in Mol pro Liter ist:

Salz	v	ε_c
Nitrat	0,5	— 1,027
	0,05	— 1,072
	0,005	— 1,102
Chlorid.	0,5	— 1,062
	0,05	— 1,090
	0,005	— 1,104
Sulfat	0,5	— 1,082
	0,05	— 1,100
	0,005	— 1,118
Acetat	0,5	— 1,081
	0,05	— 1,095
	0,005	— 1,102

Das auf die Einheitskonzentration der $Zn^{\cdot\cdot}$-Ionen bezogene Normalpotential des Zn gegen die Wasserstoff-Normalelektrode ist $\varepsilon_h = -0{,}76$ Volt. Der Lösungsdruck des Zn berechnet sich zu 10^{18} Atmosphären.

Von den Ketten zweiter Art haben das Clark-Element und das Helmholtzsche Kalomelelement als Normalelemente besondere Bedeutung erlangt. Das Clark-Element, das nach dem Schema

$$\underset{10\% Zn}{Zn_x Hg} / \underset{\text{fest}}{ZnSO_4 . 7H_2O}, \ \underset{\text{gesättigt}}{ZnSO_4}, \ \underset{\text{fest}}{Hg_2SO_4} \ Hg$$

zusammengesetzt ist, wurde, da es sehr gut definiert ist, früher allgemein als Spannungsnormale benutzt. Wegen seines großen Temperaturkoeffizienten zieht man ihm jetzt das Cadmium-Normalelement vor. Seine EMK beträgt bei 15° 1,4328 Volt; seine Temperaturabhängigkeit wird zwischen 0° und 30° wiedergegeben durch die Beziehung

$$EMK_t = 1.4328 - 0{,}00119(t - 15^0) - 0{,}057 (t - 15^0)^2 \text{ Volt.}$$

Das Kalomelelement wird nach Ostwald zweckmäßig aufgebaut aus Quecksilber, Kalomel, Zinkchloridlösung vom spezifischen Gewicht 1,409 und amalgamiertem Zink. Seine Spannung beträgt dann bei 15° annähernd 1 Volt; von der Temperatur ist es nur wenig abhängig ($0{,}0_47$ Volt pro 1°).

Von den zahlreichen anderen Kombinationen mit Zn-Elektroden sei nur noch das Daniell-Element $Zn/ZnSO_4$, $CuSO_4/Cu$ besonders erwähnt; seine EMK hängt bei gegebener Temperatur ausschließlich ab von dem Verhältnis der Konzentrationen von $ZnSO_4$ und $CuSO_4$, sie beträgt rund 1,1 Volt.

Bezeichnet man mit ε den Potentialsprung zwischen Metall und Lösung, mit $\frac{d\varepsilon}{dT}$ den Temperaturkoeffizienten desselben, so lassen sich mit Hilfe der Helmholtzschen Gleichung $F\varepsilon = q + FT \frac{d\varepsilon}{dT}$ die Energieumwandlungen, die bei den elektrochemischen Vorgängen $Zn \rightarrow Zn^{\cdot\cdot}$ und $Zn^{\cdot\cdot} \rightarrow Zn$ stattfinden, berechnen. q bedeutet in obiger Gleichung die auf das Grammäquivalent bezogene Änderung der inneren Energie des Vorganges, die Wärmetönung der chemischen Umwandlung, nach Ostwald auch als Ionisierungswärme bezeichnet, $F\varepsilon$ die elektrische Energie, die beim Durchgang der Elektrizitätsmenge $F = 96540$ Coulomb entwickelt oder verbraucht wird, $FT \frac{d\varepsilon}{dT}$ den bei dem isotherm und umkehrbar verlaufenden Vorgange erfolgenden Wärmeaustausch mit der Umgebung. Lassen wir nun 1 g-Atom Zn in einer äq.-norm. $ZnSO_4$-Lösung bei 18° in Lösung gehen, so haben wir, wenn wir in obige Gleichung die Zahlenwerte einsetzen:

$$2 . 96540 . 0{,}522 = q - 2 . 96540 . 291 . 0{,}000763$$

$$q = 143600 \text{ Voltcoulomb}$$
$$= 34300 \text{ g-cal.}$$

Der Uebergang von 1 g-Atom Zn in gelöstes Zinksalz in äq.-norm. $ZnSO_4$-Lösung bei 18° ist also mit einer Abnahme der chemischen Energie um 34300 cal. verbunden, dafür werden $2 F\varepsilon = 100750$ Voltcoulomb $= 24100$ g-cal elektrische Energie gewonnen und $2FT \frac{d\varepsilon}{dT} = 10200$ g-cal Wärme an die Umgebung abgegeben.

Wenn umgekehrt aus äq.-norm. $ZnSO_4$-Lösung 1 g-Atom Zn kathodisch niedergeschlagen wird, so werden dabei 24100 g-cal elektrische Energie und 10200 g-cal thermische Energie in 34300 g-cal chemische Energie umgewandelt.

Das $Zn^{\cdot\cdot}$-Ion besitzt eine ausgeprägte Tendenz, sich mit allerlei Neutralteilen zu Komplexionen $(Zn.nx)^{\cdot\cdot}$ zu vereinigen, auch in komplexen Anionen wie ZnO_2'', $Zn(CN)_4''$ usw. vermag Zn aufzutreten (vgl. Abschnitt 8d und e).

Die Zinksalze zeigen in wässeriger Lösung gegen Lackmus deutlich saure Reaktion, es findet eine, wenn auch geringe, so doch deutlich merkbare hydrolytische Spaltung der Molekeln statt. Die Angaben über den Grad der Hydrolyse sind sehr schwankend, wahrscheinlich weil derselbe infolge Auftretens heterogener Systeme, in denen Hydroxyd oder basische Salze als Kolloide vorliegen, mit der Zeit wechselt.

7. Nachweis und quantitative Bestimmung. Die Zinksalze ungefärbter Säuren sind farblos. Sulfat, Nitrat, Halogensalze, Acetat sind in Wasser leicht löslich, die meisten anderen Salze unlöslich, die wässerigen Lösungen reagieren infolge von Hydrolyse sauer. Die in Wasser unlöslichen Zinksalze lösen sich in den starken Mineralsäuren, die meisten auch in Ammoniumchlorid und in Alkalilauge.

Feste Zn-Verbindungen geben beim Erhitzen mit Soda auf Kohle in der Reduktionsflamme einen in der Hitze gelben, in der Kälte weißen Beschlag von ZnO; mit Kobaltnitrat befeuchtet und wieder geglüht, nimmt er grüne Farbe an (Rinnmanns Grün). Im Gang der Analyse wird Zn mittels Schwefelammonium als weißes Sulfid abgeschieden. Dieses ist löslich in starken Säuren, in schwachen, wie Essigsäure, unlöslich. H_2S fällt also aus neutralen Mineralsalzlösungen das Zink nur unvollständig, quantitativ dagegen, wenn man der Lösung Alkaliacetat hinzufügt. Starker Ueberschuß von Mineralsäure verhindert die Fällung gänzlich (s. auch unter Zinksulfid). Alkalilauge und Ammoniak rufen einen weissen Niederschlag von $Zn(OH)_2$ hervor, der sich im Ueberschuß des Fällungsmittels auflöst, im ersten Falle entsteht Alkalizinkat, im zweiten komplexe Verbindungen; auch Ammoniumsalze lösen $Zn(OH)_2$ unter Komplexbildung auf. Alkalikarbonat fällt quantitativ basisches Zinkkarbonat, dasselbe tut $(NH_4)_2CO_3$, doch löst sich im Ueberschuß desselben der Niederschlag wieder auf; Ammoniumsalze verhindern die Fällung. Mit Cyankalium entsteht $Zn(CN)_2$, löslich im Ueberschuß von KCN zum komplexen $K_2Zn(CN)_4$; mit Kaliumferrocyanid bildet sich weißes $Zn_2(Fe(CN)_6)$, bei Ueberschuß des Fällungsmittels $K_2Zn_3(Fe(CN)_6)_2$, letzteres ist unlöslich in Säuren, Ammoniak und Ammonsalzen. Natriumphosphat fällt $Zn_3(PO_4)_2$, bei Gegenwart von Ammoniak und Ammoniumsalz NH_4ZnPO_4.

Zur quantitativen Bestimmung kann Zn als ZnO (aus Karbonat, Oxalat, Nitrat usw.), ZnS, $ZnSO_4$ und NH_4ZnPO_4 oder $Zn_2P_2O_7$ zur Wägung gebracht werden.

Von den in der Technik gebräuchlichen maßanalytischen Verfahren liefern die sich des Schwefelnatriums (Schaffnersches Verfahren) und des Kaliumferrocyanids bedienenden gute Resultate, auch mit Cyankalium läßt sich Zn ähnlich wie Silber titrieren.

Sehr zahlreich sind die zur elektrolytischen Bestimmung des Zn vorgeschlagenen Methoden. Dank der hohen Ueberspannung der Wasserstoffentwickelung am Zink läßt sich dasselbe trotz seines hohen Lösungsdruckes auch aus saurer Lösung niederschlagen, doch wählt man dazu besser Lösungen komplexer Verbindungen, Oxalat-, Cyaniddoppelsalze usw., und besonders die Alkalizinkatlösungen.

Spektrum. Zinkverbindungen geben in der Flamme kein dauerndes und brauchbares Flammenspektrum; dagegen ist das Funkenspektrum der Zinksalzlösungen ein einfaches und charakteristisches, es zeigt die Linien: (β) 636,3 (orangegelb); 518,4 (grün); (α) 481,0; (γ) 472,2; (δ) 468,0, 463,0 (blau), von denen die 3 blauen α, γ, δ und die orangegelbe β charakteristisch sind. Auch der ultraviolette Teil des Spektrums enthält zahlreiche Linien.

Ein Absorptionsspektrum im sichtbaren Gebiet liefern die Zinksalze nicht; sie sind alle farblos. Mit alkoholischer Alkannatinktur gibt neutrale $ZnCl_2$-Lösung eine rotviolette Flüssigkeit, deren Absorptionsspektrum gegenüber dem der reinen alkoholischen Alkanninlösung eine teilweise Aenderung aufweist, indem der Nebenstreifen 563,8 nun am stärksten hervortritt und ein neuer schwacher Streifen auf 604,4 erscheint. Zusatz eines kleinen Tropfens Ammoniak färbt die Lösung violett und es entsteht ein neues aus 3 Streifen (601,6; 558,1; 519,5) bestehendes Absorptionsspektrum.

8. Spezielle Chemie. 8a) Verhalten gegen Säuren, Basen, Salze, Gase usw. Reines Zn wird besonders bei glatter Oberfläche infolge der hohen Ueberspannung (etwa 0,7 Volt) der Wasserstoffentwickelung am Zn von Säuren nicht angegriffen, in Berührung mit elektronegativeren Metallen (Pt, Ag, Cu usw.) oder in nicht reinem Zustande wird es leicht gelöst. Die Auflösung ist ein elektrochemischer Vorgang, ihre Geschwindigkeit hängt also wesentlich von der elektromotorischen Kraft des Prozesses und der Leitfähigkeit der Lösung ab. Oxydationsmittel (H_2O_2.HNO_3 usw.) beschleunigen die Auflösung, durch die Temperatur wird sie bei verdünnten Säuren nur wenig beeinflußt.

Mit mäßig verdünnter Schwefelsäure entsteht, wenn das Zn rein ist, bei gewöhnlicher Temperatur nur $ZnSO_4$ und Wasserstoff, bei höherer Temperatur auch H_2S und SO_2, mit konzentrierter Schwefelsäure fast nur SO_2; unreines Zn liefert auch bei niederer Temperatur und verdünnter Säure neben Wasserstoff H_2S und SO_2. Wässerige schweflige Säure löst Zn ohne Gasentwickelung. Auch Salpetersäure liefert mit Zn niemals Wasserstoff, statt dessen werden NO_2,NO, N_2O,N_2 und NH_3 in je nach der Konzentration der Säure verschiedener Menge gebildet. Chlorwasserstoff wirkt auffallenderweise in ätherischer Lösung, obwohl er darin nicht dissoziiert ist, stärker als wässerige Salzsäure, während er in anderen nicht dissoziierenden Lösungsmitteln wie Benzol Zn nicht angreift. Von Alkalilauge wird es unter Wasserstoffentwickelung und Zinkatbildung gelöst; in der Hitze auch von Ammoniak; ebenso greifen Alkali- und Ammonsalzlösungen Zn, besonders beim Erwärmen, an, meist unter Wasserstoffentwickelung. Zn scheidet die meisten Schwermetalle aus ihren Salzlösungen aus.

Destilliertes Wasser greift Zn, wenn dieses nicht ganz rein ist, schon bei gewöhnlicher Temperatur an, besonders bei Gegenwart von Luft; dabei werden durch Autoxydation des Zn reichliche Mengen von H_2O_2 gebildet, das jedoch durch Wechselwirkung mit dem Metall beim Stehen wieder zersetzt wird.

Von trockener Luft wird Zn bei gewöhnlicher Temperatur kaum merklich angegriffen, stärker von feuchter; bei gleichzeitiger Gegenwart von CO_2 entsteht basisches Carbonat. Ozon zeigt eine nur wenig energischere Wirkung als Luft. Trockenes Chlorgas reagiert mit kompaktem Zink erst in der Hitze, dasselbe gilt von den anderen Halogenen, bei Gegenwart von Wasser wird es durch Cl, Br und J ohne Gasentwickelung in die betreffenden Haloidsalze verwandelt. Trockenes NH_3 wirkt bei 600° auf Zn unter Bildung von Zinknitrid ein, NO bewirkt bei Rotglut oberflächlich Oxydation, CO_2 wird in Glühhitze zu CO reduziert, dagegen entstehen beim Erhitzen von CO mit Zn im geschlossenen Rohr auf 550° Spuren von CO_2 und C.

8b) Einfache Salze und Verbindungen. Metallverbindungen: Zink legiert sich mit den meisten Metallen, mit einer Reihe von ihnen bildet es wohlcharakterisierte Verbindungen, meist mehrere mit jedem Metall. Nachgewiesen ist die Existenz folgender: $CuZn_3$, $CuZn_4$; Ag_3Zn, AgZn, Ag_2Zn_3, Ag_2Zn_5; AuZn, Au_3Zn_5; $MgZn_2$; Sb_2Zn_3, SbZn; $FeZn_7$, $FeZn_3$; $CoZn_4$; $NiZn_3$, $NiZn_5$; $CaZn_{10}$, $CaZn_4$, $CaZn_3$, Ca_4Zn; $NaZn_{12}$. Mit der Salzvalenz der Metalle können die Verbindungen meist nicht in Uebereinstimmung gebracht werden.

Zinkfluorid, ZnF_2, entsteht aus Zn und F bei gelindem Erwärmen oder aus Zn oder ZnO und HF bei Rotglut; es bildet durchsichtige monokline Nadeln mit dem

spez. Gewicht $d_{15} = 4{,}84$. Sein Fp. liegt bei 734°, bei 800 bis 900° ist es flüchtig. Es ist in Wasser schwer, in Ammoniak leicht löslich. Säuren lösen es beim Erwärmen. Das Tetrahydrat, das aus $ZnCl_2$ oder $ZnSO_4$ und NH_4F erhalten werden kann, kristallisiert rhombisch und ist in Wasser leichter löslich als das Anhydrid. Die Bildungswärme beträgt $Zn + 2F + aq = ZnF_2, aq + 144000$ g-cal.

Zinkchlorid, $ZnCl_2$, kann auf mannigfache Weise, auch durch direkte Vereinigung der beiden Komponenten bei höherer Temperatur erhalten werden. Es bildet, aus dem Schmelzfluß erstarrt, eine weiße, undeutlich kristallinische Masse; aus hochkonzentrierten Lösungen kristallisiert es in Oktaedern oder Prismen. Aus $3NH_4Cl.ZnCl_2$ durch Erhitzen im trockenen HCl-Strom dargestellt, hat es das spezifische Gewicht $d^{25}_{4} = 2{,}907$. Es schmilzt, vollkommen rein, bei 365° (nach anderen Angaben schon bei 290° bis 300°) und siedet bei 730°. Es ist noch hygroskopischer als Phosphorpentoxyd. Die Löslichkeit in Wasser beträgt bei 20° 81,19 g $ZnCl_2$ in 100 g Lösung. Wasserhaltiges $ZnCl_2$ läßt sich durch Erhitzen oder Schmelzen nicht unzersetzt entwässern, wohl aber durch anhaltendes Erhitzen im Vakuum bis zu seinem Schmelzpunkt.

Kristallisierte Hydrate des $ZnCl_2$ sind bekannt mit 1, 1½, 2, 2½, 3 und 4 Mol. H_2O auf $1ZnCl_2$, doch ist die Existenz aller nicht vollkommen sicher, besonders die des Dihydrats erscheint zweifelhaft. Die Existenzgebiete der einzelnen Hydrate reichen weit über die Umwandlungspunkte hinaus. Mit steigender Temperatur gelangt man, wie dies meist der Fall ist, in das Gebiet niederer Hydrate. Die Umwandlungspunkte von $ZnCl_2.1\frac{1}{2}H_2O$, $ZnCl_2.H_2O$ und $ZnCl_2$ liegen zwischen 26° und 28°, die von $ZnCl_2.3H_2O$ in $ZnCl_2.2\frac{1}{2}H_2O$ und von $ZnCl_2.4H_2O$ in $ZnCl_2.3H_2O$ bei 6,5° und —30°. Auch die Hydrate sind sehr hygroskopisch; die Löslichkeit von $ZnCl_2.1\frac{1}{2}H_2O$ beträgt bei 20° 368 g auf 100 g Wasser, die von $ZnCl_2.H_2O$ bei 20° 396 g auf 100 g Wasser.

Bildungswärme:

$$Zn + 2Cl = ZnCl_2 + 97200 \text{ g-cal.}$$

Lösungswärme:

$$ZnCl_2 \rightarrow ZnCl_2, 300H_2O + 15600 \text{ g-cal.}$$

Geschmolzenes $ZnCl_2$ leitet den elektrischen Strom sehr gut, beim Schmelzpunkt zeigt sich ein ziemlich scharfer Knick in der Leitfähigkeitskurve. Zur Abscheidung von reinem Zn muß die Schmelze vollkommen wasserfrei sein. Der Zersetzungspunkt an Kohleelektroden beträgt bei 500° etwa 1,50 Volt.

In wässeriger Lösung ist $ZnCl_2$ ziemlich stark dissoziiert, läßt aber die Neigung der Zinksalze zur Selbstkomplexbildung deutlich erkennen (s. Abschnitt 6). Auch in organischen Flüssigkeiten, Alkohol, Aether, Aethylacetat, Aceton, Glyzerin u. a., ist $ZnCl_2$ in reichlicher Menge löslich; es ist in diesen Lösungen noch sehr viel stärker selbstkomplex als in Wasser, besitzt aber doch in vielen derselben eine merkliche Leitfähigkeit für den elektrischen Strom.

Zinkbromid, $ZnBr_2$, kann aus den beiden Komponenten in der Glühhitze oder in Gegenwart von Wasser erhalten werden. Es existiert wasserfrei und in Form zweier Hydrate mit 2 und $3H_2O$. Wasserfrei schmilzt es bei 394° und siedet bei 650°. Seine Kristallform ist rhombisch, das spez. Gewicht beträgt $d^{24}_{4} = 4{,}22$. Es ist sehr leicht zerfließlich; die Löslichkeit in Wasser beträgt bei 25° 82,5%, es bildet sehr leicht auch übersättigte Lösungen. Alkohol, Aether und andere organische Flüssigkeiten lösen es ebenfalls in reichlichen Mengen.

Bildungswärme:

$$Zn + Br_2 = ZnBr_2 + 75900 \text{ g-cal.}$$

Lösungswärme:

$$ZnBr_2 \rightarrow ZnBr_2, 400H_2O + 15000 \text{ g-cal.}$$

Geschmolzen leitet $ZnBr_2$ den elektrischen Strom sehr gut, sein Zersetzungspunkt bei 500° liegt bei 1,21 Volt. In wässeriger Lösung ist es noch stärker selbstkomplex als das Chlorid (vgl. Abschnitt 6). Die Zersetzungsspannung beträgt 1,81 Volt.

Zinkjodid, ZnJ_2, bildet sich leicht aus Zn und J, auch in Wasser. Das wasserfreie Salz kristallisiert regulär, es hat das spez. Gewicht 4,7, schmilzt bei 446° und ist sehr hygroskopisch. Das Dihydrat $ZnJ_2.2H_2O$ geht bei + 27° in das Anhydrid über. Die Löslichkeit in Wasser beträgt bei 18° 81,2 g ZnJ_2 in 100 g Lösung; auch in Alkohol, Aether, Aceton, Glyzerin und anderen organischen Flüssigkeiten ist ZnJ_2 löslich.

Bildungswärme:

$$Zn + 2J = ZnJ_2 + 49200 \text{ g-cal.}$$

Lösungswärme:

$$ZnJ_2 \rightarrow ZnJ_2, 400\,H_2O + 11300 \text{ g-cal.}$$

Geschmolzenes ZnJ_2 leitet den elektrischen Strom gut, beim Schmelzpunkt tritt eine scharfe Aenderung der Leitfähigkeit ein. In wässeriger Lösung ist es in hohem Grade komplex (vgl. Abschnitt 6).

Zinkcyanid, $Zn(CN)_2$, wird aus $ZnSO_4$- und $ZnCl_2$-Lösung mit Cyankalium als weißer amorpher Niederschlag gefällt; bei höherer Temperatur kann sich Zn auch direkt mit CN vereinigen. Kristallisiert erscheint es in Form rhombischer Prismen. In Wasser ist es unlöslich; es wird leicht gelöst von Cyankalium unter Bildung von komplexem

$K_2[Zn(CN)_4]$, von Ammoniak unter Bildung von komplexem Zinkammoniakcyanid, $Zn(NH_3)_2(CN)_2$ und Ammoniumzinkcyanid $NH_4Zn(CN)_3$; Kalilauge löst es zu einem Gemisch von Zinkat und Kaliumzinkcyanid.

Zinkferrocyanid, $Zn_2[Fe(CN)_6]$, fällt als weißer Niederschlag beim Versetzen einer Zinksalzlösung mit $K_4Fe(CN)_6$, überschüssiges K_4FeCN_6 fällt $K_2Zn_3[FeCN_6]_2$; beide sind in Säuren, Ammoniak und Ammoniumsalzen unlöslich. Die Reaktion ist außerordentlich empfindlich, man kann sie auch zur titrimetrischen Bestimmung des Zn benutzen.

Zinkoxyd, ZnO, tritt in der Natur als Rotzinkerz oder Zinkit auf, es bildet sich in großen Mengen im Zinkhüttenbetrieb, nicht selten in kristallisierter Form. Rein kann man es durch Verbrennen von Zn an der Luft oder durch Glühen von Zinkhydroxyd, -carbonat oder auch -nitrat gewinnen; bei starkem Glühen im O-Strom nimmt das amorphe ZnO Kristallform an, es kristallisiert hexagonal. Es hält sehr hohe Hitzegrade aus, bei Gegenwart von Reduktionsmitteln dagegen wird es schon bei verhältnismäßig niederer Temperatur zersetzt. Kristallisiertes ZnO hat das spez. Gewicht 5,70, amorphes 5,47. Seine Bildungswärme beträgt 85400 g-cal., die spez. Wärme 0,1248. Die Löslichkeit in Wasser ist sehr gering, in Laugen und Ammoniak je nach der Vorbehandlung verschieden.

Zinkperoxyd, ZnO_2, ein echtes Salz des Wasserstoffsuperoxyds, kann rein mit $\frac{1}{2}H_2O$ aus $Zn(C_2H_5)_2$ und H_2O_2 in ätherischer Lösung erhalten werden. Die aus wässeriger Lösung mittels H_2O_2 dargestellten wasserhaltigen Produkte sind Gemische von ZnO_2 und ZnO.

Zinkhydroxyd. Der durch Alkali aus Zinksalzlösungen gefällte amorphe Niederschlag $Zn(OH)_2$ ist selten rein, er hält hartnäckig Alkali oder basisches Salz fest; rein kann man $Zn(OH)_2$ aus dem Nitrat mittels NaOH abscheiden. Auch durch Elektrolyse von Alkalisalzen unter Anwendung einer Zinkanode kann $Zn(OH)_2$ gewonnen werden. Kristallisiert erhält man es, indem man Zn in Berührung mit Fe oder Cu in Alkali- oder Ammoniaklösung eintaucht, oder beim langen Stehen einer gesättigten Lösung von $Zn(OH)_2$ in Natronlauge, es kann rhombisch und regulär kristallisieren. Die Löslichkeit in Wasser wurde zu $2{,}6 . 10^{-5}$ bestimmt.

Bildungswärme:

$Zn + O + H_2O = Zn(OH)_2 + 82700$ g-cal.

Neutralisationswärmen:

$Zn(OH)_2 + 2HCl, aq = ZnCl_2, aq + 19880$ g-cal;

$Zn(OH)_2 + 2HNO_3, aq = Zn(NO_3)_2, aq + 19830$ g-cal;

$Zn(OH)_2 + H_2SO_4, aq = ZnSO_4, aq + 23400$ g-cal;

$Zn(OH)_2 + 2CH_3COOH, aq = Zn(CH_3COO)_2, aq + 18030$ g-cal;

$Zn(OH)_2 + 2HCN, aq = Zn(CN)_2, aq + 16300$ g-cal.

Zinkhydroxyd ist ein amphoterer Elektrolyt, der sich in Säuren und starken Basen unter Salzbildung löst, allerdings ist seine Säurefunktion nur gering. Zur Lösung von $Zn(OH)_2$ sind mindestens 4 Mol. KOH auf 1 Zn nötig.; die Lösung wird durch Verdünnung mit Wasser wieder gefällt, auch durch Erwärmen oder Zusatz von NaCl wird die Hauptmenge des $Zn(OH)_2$ spontan ausgeschieden; bei 50° braucht man zur Lösung dreimal mehr KOH als bei 17°. Mit wachsender Konzentration der Hydroxylionen nimmt der Zinkgehalt der Lösungen zu, schwächeres als 0,292 norm. KOH löst überhaupt kein $Zn(OH)_2$ mehr. Das Zinkhydroxyd ist in den alkalischen Lösungen nur z. T. als Zinkat (ZnO_2Na_2 und ZnO_2HNa) gelöst, der andere Teil ist als Kolloid vorhanden. Eine Reihe von Zinkaten wie $Na(HZnO_2) . 3H_2O$, $Sr(HZnO_2)_2 . 7H_2O$, $Ca(HZnO_2)_2 . 4H_2O$ u. a. sind auch in Kristallform erhalten worden. Bei den ammoniakalischen Lösungen von $Zn(OH)_2$ liegen die Verhältnisse anders als bei den alkalischen, hier ist die Konzentration der OH'-Ionen zu gering, als daß eine Bildung von Zinkaten stattfinden könnte; es bilden sich vielmehr, wie Ueberführungs-, Diffusions-, Löslichkeitsversuche und Potentialmessungen zeigten, komplexe Zinkammoniakkationen (vgl. Abschnitt 8 d); durch Zusatz von Säuren werden diese Komplexe zerstört.

Zinksulfid, ZnS, stellt eines der wichtigsten Zinkmineralien (Zinkblende) dar; es ist dimorph, als Blende meist regulär (hexakistetraedrisch), als Würtzit hexagonal; künstlich entstehen meist hexagonale Kristalle. Das spez. Gewicht beträgt 3,5 bis 4,2, die spez. Wärme zwischen 0° und 100° 0,1146, die Bildungswärme $Zn + S + nH_2O = ZnS . nH_2O + 41600$ g-cal.

Das aus wässeriger Lösung eines Zinksalzes durch H_2S oder Alkalisulfid gefällte ZnS ist stets wasserhaltig, die Existenz eines bestimmten Hydrates hat sich indes nicht sicher nachweisen lassen. Die Fällung durch H_2S aus essigsaurer Lösung ist quantitativ, aus neutraler Lösung eines mineralsauren Salzes nur dann, wenn die Lösung verdünnt ist und H_2S lange genug eingeleitet wird, sie wird um so unvollständiger, je konzentrierter die Lösungen sind und je mehr freie Säure sie enthalten. Da die Löslichkeit des ZnS in Wasser außerordentlich gering ist, wandelt H_2S andere schwer lösliche Verbindungen wie Oxyd, Carbonat und Cyanid in wässeriger Suspension in ZnS um.

Zinkselenid, ZnSe, Zinktellurid,

$ZnTe$, Zinknitrid, Zn_3N_2, Zinkphosphid, Zn_3P_2 und Zinkarsenid, Zn_3As_2, lassen sich auf pyrochemischem Wege gewinnen.

Zinksulfat, $ZnSO_4$, tritt normal als Heptahydrat auf, es kristallisiert rhombisch, zuweilen auch monoklin. Es ist stabil unterhalb 39°, oberhalb findet langsam Umwandlung in das Hexahydrat statt. Seine Löslichkeit beträgt bei 0° 41,9 g, bei 15° 50,8 g, bei 25° 57,95 und bei 39° 70,05 g $ZnSO_4$ in 100 g Wasser. Das wasserfreie Salz kristallisiert rhombisch und ist ziemlich hitzebeständig, sein spez. Gewicht beträgt 3,40.

Bildungswärme:

$Zn + S + 4O = ZnSO_4 + 231000$ g-cal.

Lösungswärme:

$ZnSO_4 \rightarrow ZnSO_4, 400\,H_2O + 10434$ g-cal.
$ZnSO_4, 7H_2O \rightarrow ZnSO_4, 400\,H_2O - 4260$ g-cal.

In wässeriger Lösung ist $ZnSO_4$ ziemlich stark dissoziiert, zeigt aber deutlich Neigung zur Selbstkomplexbildung (vgl. Abschnitt 6). Die Zersetzungsspannung beträgt 2,35 Volt.

Zinksulfit wird gewöhnlich als Dihydrat $ZnSO_3.2H_2O$ erhalten, es ist ziemlich unbeständig.

Zinkselenat kann in verschiedenen Hydratstufen auftreten, das Hexahydrat kristallisiert quadratisch, das Pentahydrat triklin.

Zinknitrat, $Zn(NO_3)_2$, tritt gewöhnlich als Hexahydrat auf. Es schmilzt bei 36,4°, bei 100° geht es in das Trihydrat über, zugleich beginnt auch Zerfall. Seine Löslichkeit in Wasser beträgt bei 18° 53,50 g $Zn(NO_3)_2$ in 100 g Lösung. Spezifisches Gewicht d^{15}_{4} = 2,067.

Bildungswärme:

$Zn + 2N + 6O + 6H_2O = Zn(NO_3)_2.6H_2O + 138200$ g-cal.

Lösungwsärme:

$Zn(NO_3)_2.6H_2O \rightarrow Zn(NO_3)_2, 400H_2O - 5840$ g-cal.

In wässeriger Lösung ist es stark dissoziiert (vgl. Abschnitt 6).

Zinkphosphate. Das Orthophosphat $Zn_3(PO_4)_2$ entsteht bei der Fällung von Zinksulfat in essigsaurer Lösung mittels Na_2HPO_4 als Tetrahydrat. Das Pyrophosphat $Zn_2P_2O_7$ erhält man gewöhnlich durch Glühen von NH_4ZnPO_4, das aus den mit NH_4Cl versetzten Zinksalzlösungen durch Ammonphosphat quantitativ abgeschieden wird.

Zinkarsenate können als neutrale, saure und basische Salze erhalten werden. Das neutrale Salz $Zn_3(AsO_4)_2.3H_2O$ erhält man beim Neutralisieren einer salzsauren Lösung mit Alkali; in der Natur kommt das Hydrat $Zn_3(AsO_4)_2.8H_2O$ vor.

Zinkborat, $Zn_3B_2O_6$, bildet sich in der Schmelze von ZnO und B_2O_3 in KHF_2; aus $ZnSO_4$- und Boraxlösung bei Gegenwart von $NaOH$ erhält man $3ZnO.4B_2O_3.H_2O$.

Zinkcarbonat, $ZnCO_3$, findet sich in der Natur als Zinkspat oder Galmei; es bildet hexagonale Kristalle mit dem spez. Gewicht 4,4 bis 4,6. Bei der Fällung von Zinksalzen durch Alkalicarbonate entstehen basische Produkte, bei Anwendung saurer Alkalicarbonate kann aber auch das neutrale Salz erhalten werden.

Zinksilikat, Zn_2SiO_4, tritt in der Natur unter dem Namen Willemit, als Monohydrat $Zn_2SiO_4.H_2O$ unter dem Namen Kieselzinkerz auf (Kieselgalmei, Calamin); jenes kristallisiert hexagonal, dieses rhombisch. Zn_2SiO_4, $ZnSiO_3$ u. a. können kristallisiert, auch künstlich auf pyrochemischem Wege dargestellt werden.

Zinkacetat. Aus wässeriger Lösung scheidet sich das Dihydrat $Zn(CH_3CO_2)_2.2H_2O$ in Form monokliner Kristalle aus, bei 100° verwandelt es sich in das Anhydrid. Dieses schmilzt bei 241°, jenes bei 236°. In Wasser ist das Salz sehr leicht löslich. In wässriger Lösung ist es mäßig stark dissoziiert und läßt Selbstkomplexbildung erkennen (vgl. Abschnitt 6).

Zinkoxalat wird aus neutraler oder schwach saurer Zinksalzlösung durch Oxalsäure oder Alkalioxalat als Dihydrat $ZnC_2O_4.2H_2O$ gefällt. Bei 100° verliert es das Wasser, bei stärkerem Erhitzen werden gleiche Volumen CO_2 und CO abgespalten. Es ist in Wasser sehr wenig löslich (etwa 7.10^{-5} Mol pro Liter); in großem Ueberschuß von Mineralsäuren, in Ammoniak und auch in Ammonsalzen löst es sich, desgleichen in Alkalioxalat unter Bildung komplexer Doppeloxalate.

8c) Basische Salze. Die Zahl der basischen Zinksalze ist sehr groß. Sie werden gewöhnlich erhalten durch Verdünnen oder Erwärmen ammoniakalischer Zinksalzlösungen oder durch Umsetzung von Lösungen der betreffenden Neutralsalze mit ZnO, $CaCO_3$ usw. Zur Charakterisierung der Mannigfaltigkeit in der Zusammensetzung dieser Oxyverbindungen sollen hier nur die Oxychloride, die in der Literatur beschrieben worden sind, angeführt werden:

$Zn_4OCl_6.H_2O$	$Zn_7O_5Cl_4.26H_2O$
$Zn_4O_3Cl_2.2H_2O$	$Zn_7O_6Cl_2.6H_2O$
$Zn_5O_3Cl_4.11H_2O$	$Zn_9O_8Cl_2.10H_2O$
$Zn_5O_4Cl_2.6H_2O$	$Zn_{10}O_9Cl_2.3H_2O$
$Zn_6O_5Cl_2.8H_2O$	$Zn_{11}O_9Cl_4.12H_2O$

Eine ähnliche Mannigfaltigkeit wurde bei den basischen Salzen mit anderen Säuren beobachtet. Bei weitaus den meisten dieser Stoffe, auch bei einem Teil der in Kristallform erhaltenen, dürfte es sich nicht um wirkliche chemische Verbindungen handeln, wenigstens erscheint der sichere Nachweis

chemischer Individualität nur für eine verhältnismäßig kleine Zahl erbracht.

8d) Additionsverbindungen (Salze mit komplexem Kation). Zink besitzt in hohem Grade die Fähigkeit, allerlei Neutralverbindungen zu addieren, und zwar kommt diese Fähigkeit nicht nur dem Zn··-Ion, sondern auch dem Metall selbst zu. Im letzteren Fall entstehen Verbindungen, die nicht Salzcharakter besitzen: $Zn(CH_3)_2$, $Zn(NH_3)_2$ u. a. Besondere Bedeutung haben von diesen die Zinkalkylverbindungen, $Zn(CH_3)_2$, $Zn(C_2H_5)_2$ usw. erlangt, die als außerordentlich reaktionsfähige Körper zu zahlreichen Synthesen Verwendung finden.

Die durch Anlagerung von Neutralteilen an Zn··-Ion entstehenden komplexen Kationen (Zn.nX)·· scheinen stärkere Ionen zu sein als Zn··. Die Anzahl der angelagerten Moleküle beträgt meist 2, höchstens 6 auf 1 Zn. Von den sehr zahlreichen Verbindungen dieser Art sind in erster Linie die in großer Mannigfaltigkeit auftretenden Zinkammoniaksalze zu nennen. Von $ZnCl_2$ sind z. B. folgende, z. T. gut kristallisierende Ammoniakverbindungen bekannt: $Zn(NH_3)Cl_2$, $Zn(NH_3)_2Cl_2$, $Zn(NH_3)_4Cl_2$, $Zn(NH_3)_5Cl_2$ und $Zn(NH_3)_6Cl_2$, einige auch in Form von Hydraten. Sie sind an der Luft leicht zerfließlich und nur die beiden ersten besitzen unter gewöhnlichen Verhältnissen größere Beständigkeit, wie auch die folgende Zusammenstellung ihrer NH_3-Dampfspannungen p in mm Hg bei t° erkennen läßt.

	78°	216°
$Zn(NH_3)Cl_2$		6,7 mm
$Zn(NH_3)_2Cl_2$		43,6 „
$Zn(NH_3)_4Cl_2$	402,2 mm	
$Zn(NH_3)_6Cl_2$	1634,7 „	

Die Bildungswärmen betragen

$$ZnCl_2 + 2NH_3 = Zn(NH_3)_2Cl_2 + 44200 \text{ g-cal.}$$
$$„ \quad + 4NH_3 = Zn(NH_3)_4Cl_2 + 68000 \quad „$$
$$„ \quad + 6NH_3 = Zn(NH_3)_6Cl_2 + 90000 \quad „$$

Aehnliche Verbindungen, wenn auch in geringerer Anzahl, sind von den meisten Zinksalzen dargestellt worden. Auch die Löslichkeit von $Zn(OH)_2$ in Ammoniak ist auf die Bildung eines komplexen Kations, wahrscheinlich $[Zn(NH_3)_4]^{··}$, zurückzuführen.

Bei den sehr zahlreichen Additionsverbindungen der Zinksalze mit organischen Stoffen beträgt die Zahl der addierten Molekeln fast durchweg 2. Es sind Verbindungen bekannt mit Hydrazin, Phenylhydrazin, Hydroxylamin, Alkylaminen, Aethylendiamin, Anilin und Homologen, Pyridin, Chinolin, Harnstoff, Thioharnstoff und anderen Stoffen aus fast allen Gruppen der organischen Verbindungen. Sie sind meist in organischen Flüssigkeiten, z. T. auch in Wasser löslich, von Säuren werden sie unter Bildung von Doppelsalzen zerlegt.

8e) Doppel- und Komplexsalze. Zinkchlorid bildet mit HCl zwei kristallisierende Verbindungen $2ZnCl_2.HCl.2H_2O$ (Rhomboeder) und $ZnCl_2.HCl.2H_2O$ (lange Nadeln). Es sind wahrscheinlich komplexe Säuren $H(Zn_2Cl_5).2H_2O$ und $H(ZnCl_3).2H_2O$; auch die analog zusammengesetzten Zinkalkalidoppelsalze sind in wässeriger Lösung merklich komplex. Man kennt Doppelhaloidsalze, wie

K_2ZnF_4	K_2ZnCl_4
$NaZnF_3$	$(NH_4)_3ZnCl_5$
$(NH_4)_2ZnF_4.2H_2O$	$BaZnCl_4.4H_2O$
$(NH_4)_2ZnBr_4$	$KZnJ_3$
$(NH_4)_3ZnBr_5$	$Na_2ZnJ_4.3H_2O$
	$(NH_4)_2ZnJ$

Für die organische Chemie besonders wichtig geworden sind die zahllosen analog konstituierten Doppelverbindungen, welche die Zinkhaloide, besonders $ZnCl_2$, mit den Hydrohalogenverbindungen organischer Stoffe zu bilden vermögen; sie werden wegen ihrer guten Kristallisierbarkeit häufig zur Abscheidung und Analyse jener Stoffe benutzt.

Ausgeprägte Komplexsalze sind die Zinkdoppelcyanide der Alkali- und Erdalkalimetalle. Das bekannteste ist das Kaliumsalz $K_2[Zn(CN)_4]$. Es bildet sich beim Lösen von Zn, ZnO oder $Zn(CN)_2$ in wässerigem KCN, kristallisiert in großen regulären Oktaedern, schmilzt ohne Zersetzung und ist in Wasser leicht löslich. Die wässerige Lösung reagiert infolge von Hydrolyse schwach alkalisch, H_2S fällt daraus nur wenig ZnS. Durch Säuren wird es zersetzt, mit $AgNO_3$ setzt es sich um zu $KAg(CN)_2$ und $Zn(NO_3)_2$.

Bei den Zinkdoppelsulfaten kann man hauptsächlich zwei Gruppen unterscheiden: Die eine umfaßt die Alkalizinksulfate; sie haben die Zusammensetzung $X_2Zn(SO_4)_2.6H_2O$ (X = K, Rb, Cs, NH_4; das Na-Salz kristallisiert mit $4H_2O$) und kristallisieren monoklin. Den Sulfaten von Mg, Fe, Ni, Co, Mn, Be gegenüber zeigt $ZnSO_4$, der weitgehenden Isomerie der Vitriole entsprechend, sehr gute Mischbarkeit; von gemischten Vitriolen mit rationalen Molarverhältnissen kennt man z. B. $ZnMg(SO_4)_2.14H_2O$, $ZnFe(SO_4)_2.14H_2O$, $ZnNi(SO_4)_2.13H_2O$, $ZnMn(SO_4)_2.10H_2O$ und $ZnMn(SO_4)_2.14H_2O$. Letztere Verbindung ist dimorph, monoklin und rhombisch, entsprechend dem monoklinen und rhombischen $ZnSO_4.7H_2O$. Auch Kupfersulfat kann mit Zinksulfat Mischkristalle bilden, die entsprechend dem triklinen $CuSO_4.5H_2O$ und dem monoklinen und rhombischen $ZnSO_4.7H_2O$ 3 verschiedenen Typen angehören können. Schließlich kann man auch Mischkristalle erhalten, die neben Zn mehr als ein anderes Metall enthalten,

$K_4ZnX^{II}(SO_4)_4 . 12H_2O$ (X^{II}=Mg, Fe, Mn, Co, Ni, Cu), sogar Verbindungen wie $K_8ZnMgCoCu(SO_4)_8 . 24H_2O$ sind erhalten worden; es kommt darin zum Ausdruck, wie enge Isomerieverhältnisse hier bestehen. Ganz analog verhalten sich die Selenate; auch doppeltgemischte Verbindungen wie $K_2ZnSO_4SeO_4 . 6H_2O$ oder $CuZn_3SeO_4(SO_4)_3 . 28H_2O$ sind bekannt.

In großer Mannigfaltigkeit sind Doppelverbindungen auch von Sulfiten, Thiosulfaten, Seleniten, Carbonaten, Phosphaten Arsenaten und schließlich auch von Salzen organischer Säuren, Formiaten, Oxalaten usw. dargestellt worden.

9. **Kolloidchemie.** Das Hydrosol des Zinks ist durch elektrische Zerstäubung von Zinkkathoden im Lichtbogen als tiefdunkle, äußerst instabile, häufig schon während des Versuchs koagulierende Flüssigkeit erhalten worden. Weit stabiler sind das braune Aethylätherosol und das braunrote, im reflektierten Licht grauschwarze Isobutylalkohosol, die durch Zwischenlagerung von granuliertem, mit der betreffenden Flüssigkeit bedecktem Metall zwischen die Pole der Sekundärleitung eines Funkeninduktoriums dargestellt werden können.

Von den Zinkverbindungen neigen das Zinkcyanid und besonders das Sulfid dem kolloidalen Zustande zu. Auch scheint das Zinkhydroxyd in den Zinkatlösungen, wenigstens zum Teil, kolloidal gelöst zu sein, da sich aus den wässerigen Lösungen, nur ganz konzentrierte ausgenommen, die Hauptmenge des $Zn(OH)_2$ langsam, beim Erwärmen oder bei Zusatz von NaCl spontan ausscheidet, ebenso lassen die Leitfähigkeit und das Verhalten der alkalischen Lösungen bei der Verseifung von Aethylacetat diese Auffassung gerechtfertigt erscheinen.

Das Hydrosol des Zinksulfids kann dadurch dargestellt werden, daß das Gel aus ammoniakalischer Zinksulfatlösung durch H_2S gefällt und dann durch Dekantieren mit H_2S-Wasser in das Hydrosol übergeführt wird, oder man suspendiert reines $Zn(OH)_2$ in Wasser und verwandelt dieses durch Einleiten von Schwefelwasserstoff in das Sulfidsol. Dieses wird durch sämtliche Elektrolyte gelatiniert, auch längeres Kochen führt zur Präzipitation; durch Behandlung mit H_2S kann das Gel dann von neuem peptisiert werden. In stark verdünntem Zustande erscheint das Hydrosol ungefärbt, konzentriert als schwach orangerote, im auffallenden Lichte weiße, milchähnliche Flüssigkeit. Die violetten, blauen und grünen Strahlen des Spektrums erfahren durch das Hydrosol eine starke Schwächung, die gelben und roten bleiben ungeschwächt. Da Medien mit hoher innerer Reibung die Hydrosolbildung stark begünstigen, so kann ein einige Tage haltbares Hydrosol des ZnS auch durch Zusatz z. B. von Glyzerin zu einer Zinksulfatlösung mit Schwefelammonium erhalten werden.

Literatur. ***K. Drucker,*** *Zink. In Abeggs Handbuch der anorganischen Chemie, Bd. II 2, Leipzig 1905.* — ***W. Roth,*** *Zink. In Gmelin, Kraut, Friedheim und Peters' Handbuch der anorganischen Chemie, Bd. IV, Heidelberg 1911.*

C. Tubandt.

g) Cadmium.

Cd. Atomgewicht 112,40.

1. **Vorkommen.** Das Cadmium (Atomgewicht Cd = 112,40) gehört zu den seltener vorkommenden Elementen. Als selbständiges Mineral tritt es in geringen Mengen als Sulfid (Greenockit) in Schottland, Böhmen, Siebenbürgen und Pennsylvania und als Carbonat (Otavit) auf; wichtiger ist sein Vorkommen als fast ständiger Begleiter des Zinks, besonders in Blende und Galmei, doch beträgt deren Cadmiumgehalt meist weniger als 1%; als höchster Gehalt der Zinkblende an Cadmium wurden etwa 5% ermittelt.

2. **Geschichtliches.** Als Element erkannt wurde das Cadmium 1817 von Stromeyer in Hannover, der ihm nach seinem Vorkommen im Ofenbruch (cadmia fornacum) auch den Namen gab, und fast gleichzeitig und unabhängig 1818 von Hermann in Schönebeck.

3. **Darstellung.** Gewonnen wird das Cadmium als Nebenprodukt des Zinkhüttenbetriebs. Da es leichter flüchtig ist als Zink, geht es bei der Destillation vor diesem über. Durch mehrmalige Fraktionierung bei möglichst niederer Temperatur, eventuell unter Zuschlag von Eisen- oder Mangancarbonat, welche Zink zurückhalten, wird ein fast reines Metall mit mindestens 99,5 bis 99,8% Cd erhalten. Auch auf nassem Wege, z. B. durch Auslaugen oxydischer Erze mit saurer Ferrisulfat- oder mit Zinkchloridlösung und Fällung des Cadmiums durch metallisches Zink, sowie durch Elektrolyse gelöster oder geschmolzener Cadmiumsalze kann das Metall gewonnen werden. Die vollkommene Reinigung des Handelsproduktes kann durch Destillation im Wasserstoffstrom oder durch mehrmalige Sublimation im Vakuum — in der Luftleere ist Cadmium schon bei 156°

flüchtig — oder auch durch Elektrolyse reiner Cadmiumsalze unter Anwendung von Anoden aus Rohcadmium erfolgen.

4. Verwendung. Das Cadmium findet schon wegen der geringen Menge, in der es gewonnen wird, nur eine beschränkte Verwendung. Im Laboratorium benutzt man es namentlich zur Herstellung von Normalelementen, zur Erzeugung einer monochromatischen Lichtquelle und zur Erzielung von Spektrenmischungen (Heraeussche Vakuummetalldampflampen). Im praktischen Leben wird es fast ausschließlich nur in Verbindung mit anderem Metallen verwendet. Seine Legierungen zeichnen sich meist durch Leichtschmelzbarkeit aus, sie werden als Metallkitt, zum Schnellöten und zur Herstellung von Klischees benutzt. Eine Legierung mit Aluminium (5% Cd) zeichnet sich durch ganz besondere Zähigkeit aus; leider kommt wegen der zu geringen Menge, in der Cadmium gewonnen wird, eine ausgedehnte Anwendung derselben, z. B. für militärische Zwecke nicht in Frage. Das Sulfid findet als Cadmiumgelb und Jaune brillant Verwendung als Malerfarbe und zur Färbung von Geweben; es ist durch hohe Deckkraft und Widerstandsfähigkeit gegen Säuren und Alkalien ausgezeichnet. Bromid und Jodid werden in der Photographie, das Sulfat in der Augenheilkunde gebraucht.

5. Physikalische Eigenschaften und Konstanten. Das Cadmium kann in wohlausgebildeten Kristallen erhalten werden, die dem hexagonalen System angehören und das Achsenverhältnis a:c = 1:1,335 (Termier) aufweisen; es ist mit Zink isomorph. Hämmern und Walzen macht das aus dem Schmelzfluß entstehende kristallinische Gefüge feinkörnig; Erwärmen auf 200 bis 250° läßt die kristallinische Struktur deutlicher und schöner hervortreten.

Das spezifische Gewicht beträgt nach neueren Untersuchungen für ungepreßtes Metall $d^{20}_{4} = 8,64819$, für gepreßtes 8,64766; für gewalztes Metall wurde $d^{16} = 8,6603$, für unter Druck aus enger Oeffnung geflossenes 8,6558 und nach dem Anlassen 8,6633 gefunden. Der Schmelzpunkt liegt bei 321,7°, der Siedepunkt bei 778°. Merkliche Verdampfung tritt schon bei 300°, im Vakuum bereits bei 156° ein.

Von den zahlreichen Angaben über die spezifische Wärme seien nur die von Behn erwähnt: zwischen 100 und 18° 0,056; zwischen + 18 und — 79° 0,0537 und zwischen — 79° und — 186° 0,0498.

Die Schmelzwärme wurde zu 13,66 g-cal, die Verdampfungswärme zu 28,0 g-cal ermittelt.

Der lineare Ausdehnungskoeffizient beträgt bei 40° $3,069.10^{-5}$, für den kubischen Ausdehnungskoeffizienten wurde in Uebereinstimmung mit jenem $9,4.10^{-5}$ gefunden.

Die Wärmeleitfähigkeit des Cadmiums beträgt 57,7% von der des Silbers, das absolute Leitvermögen (cm, g, sec., 1°) bei 18° 0,2216, bei 100° 0,2149.

Die Leitfähigkeit für Elektrizität beträgt im Vergleich zu Ag = 100 (bei 0°) 24,58; in rezipr. Ohm pro cm-Würfel ist die spezifische Leitfähigkeit von gegossenem Cadmium bei 18° $13,13.10^4$, bei 100° $9,89.10^4$; von Draht bei 18° $13,25.10^4$, bei 100° $10,18.10^4$.

Für die Oberflächenspannung des geschmolzenen Metalls fand man bei 365° (Dichte 7,9252) 83,18 mg/mm, bei 431° (Dichte ebenfalls 7,9252) 80,835; für die spezifische Kohäsion 20,991 bzw. 20,633 qmm; in CO_2 ergab sich die Oberflächenspannung 70,65, die spezifische Kohäsion 10,84.

Das elektrochemische Aequivalent des Cadmiums ist 0,5821 mg pro Coulomb, 2,096 g pro Ampère-Stunde.

Cadmium ist ein weißes (Farbe zwischen Sn und Zn), stark glänzendes Metall. Es ist so weich, daß es sich schneiden läßt; man kann es leicht zu Draht ausziehen und in dünne Blättchen ausbreiten. Das feste Metall ist deutlich plastisch, für die Ausflußgeschwindigkeit gilt die Reihenfolge (stark bis gering): K, Na, Pb, Sn, Bi, Cd, Zn, Sb.

Dampfförmiges Cadmium besteht nach Dampfdichtebestimmungen bei 1040° aus einatomigen Molekeln; dasselbe gilt, wie kryoskopische Messungen ergaben, für Lösungen des Cadmiums in anderen Metallen wie Hg, Bi, Sn.

6. Elektrochemie. Cadmium bildet nur eine Reihe von Verbindungen, sein Ion ist stets zweiwertig. Wohl liegen auch Andeutungen für die Existenz einiger anderer Verbindungstypen vor, doch ist über deren Natur noch wenig bekannt. Das Peroxyd CdO_2 ist ein Salz des Wasserstoffsuperoxyds; die chemische Individualität der von einigen Autoren angenommenen Suboxyde Cd_4O und Cd_2O, sowie die vermutete Existenz eines einwertigen Cadmiumions bedürfen noch weiterer Beweise.

Von den Salzen des Cadmiums ist das Nitrat in wässeriger Lösung stark dissoziiert, Sulfat und die Haloide dagegen zeigen eine verhältnismäßig geringe Dissoziation; der vollständiger Dissoziation entsprechende Grenzwert der elektrischen Leitfähigkeit Λ_∞ wird erst bei viel stärkeren Verdünnungen erreicht als bei anderen Salzen. Elektrische und osmotische Messungen deuten darauf hin, daß die Lösungen dieser Salze erhebliche Mengen komplexer Ionen enthalten. Die Neigung zur Selbstkomplexbildung ist besonders stark beim Jodid ausgeprägt und nimmt über das Bromid zum Chlorid hin ab. Diese Verschiedenheit der Disso-

ziationsverhältnisse der Cadmiumsalze kommt z. B. darin zum Ausdruck, daß in Ketten $Cd\,CdX_2, CdY_2|Cd$ das Cadmiumchlorid gegenüber dem Bromid und Jodid, da es mehr $Cd^{\cdot\cdot}$-Ionen enthält als diese, positiv (+0,005 Volt bezw. +0,015 Volt), gegen das bedeutend stärker dissoziierte Cadmiumnitrat dagegen negativ (— 0,024 Volt) geladen erscheint. Auch die elektrische Leitfähigkeit läßt den verschiedenen Grad der Komplexität der Cd-Salze sehr schön erkennen (μ = Molarleitfähigkeit bei 18°):

	$CdNO_3$	$CdCl_2$	$CdBr_2$	CdJ_2
μ_{1000}	101,3	97,9	96,2	91,6
μ_{32}	82,4	63,0	53,8	41,9

Während bei der hohen Verdünnung 1000 also fast gleiche Leitfähigkeit beobachtet wird, und man in Anbetracht der ziemlich gleichen Beweglichkeit der 4 Anionen auf gleichen Dissoziationsgrad schließen kann, geht bei höherer Konzentration die Ionisation von Chlorid zu Jodid zunehmend stark zurück, was auf zunehmende Komplexität der gelösten Salze deutet, nur beim Nitrat erfolgt der Rückgang in dem Betrag, wie er von einem normal dissoziierten ternären Salz ungefähr zu erwarten ist.

Besonders deutlich tritt die Existenz komplexer Ionen aber aus den Messungen der Ueberführungszahlen hervor. Die folgenden Tabellen enthalten die Ueberführungszahlen n der Anions vom $CdCl_2$, $CdBr_2$ und CdJ_2 für verschiedene Verdünnungen (v = Liter pro Mol):

Cadmiumchlorid:

v	0,24	0,52	0,75	0,9	16—312
$n_{Cl'}$	1,137	0,801	0,724	0,567	0,670±0,0003

Cadmiumbromid:

v	2	4	8	12	16—300
$n_{Br'}$	0,782	0,650	0,601	0,576	0,570±0,0005

Cadmiumjodid:

v	0,57	16,1	24,4	32,2	48,25
$n_{J'}$	1,245	0,719	0,657	0,619	0,593
v	60,9	63,8	80—300		
$n_{J'}$	0,578	0,573	0,557±0,0005		

Es geht daraus hervor, daß in konzentrierteren Lösungen ein großer Teil des Cd in Form komplexer Anionen zur Anode wandert.

Die Ueberführungszahl sinkt mit zunehmender Verdünnung, bei stärkeren Verdünnungen wird ein Grenzwert erreicht, bei Chlorid und Bromid erheblich früher als beim Jodid, wo also keine merkliche Komplexbildung mehr vorliegt. Für das Kation beträgt dieser Grenzwert für $CdCl_2$ 0,430, für $CdBr_2$ 0,430, für CdJ_2 0,443.

Aehnliches gilt für das Cadmiumsulfat; der von der Konzentration der Lösung unabhängige Grenzwert der Ueberführungszahl des $Cd^{\cdot\cdot}$-Ions ergab sich hier zu 0,379.

In alkoholischer Lösung findet, wie Ueberführungsmessungen zeigen, Komplexbildung in noch bedeutend höherem Maße statt.

Für die aus den Ueberführungszahlen berechnete Beweglichkeit des $Cd^{\cdot\cdot}$-Ions bei unendlicher Verdünnung ergibt sich bei den Haloiden ein anderer Wert als beim Sulfat, nämlich aus

	$u_{1/2 Cd^{\cdot\cdot}}$
$CdCl_2$	49
$CdBr_2$	50
CdJ_2	53
$CdSO_4$	42

Eine Entscheidung ist bei der für mehrwertige Metallionen allgemein bestehenden Unsicherheit der Ueberführungszahlen und der extrapolierten Leitfähigkeitswerte bei unendlicher Verdünnung zurzeit nicht zu treffen, man muß sich in diesen Fällen mit Näherungswerten begnügen; nach Kohlrausch wählt man für die Beweglichkeit des $Cd^{\cdot\cdot}$-Ions zweckmäßig den Wert 46.

Auch die Messungen des Potentials von Cadmium gegen die Lösung seiner Salze lassen, wie schon erwähnt, Komplexbildung bei den letzteren erkennen. In der folgenden Tabelle sind solche Potentialmessungen angeführt, auch der Einfluß, den die Gegenwart von Alkalisalzen mit gleichem Anion wie das betreffende Cadmiumsalz ausübt, wird daraus ersichtlich; die Potentialwerte beziehen sich auf die Calomel-Normalelektrode, die Salzkonzentrationen bedeuten Mol pro Liter:

Cd-Salz- Konzentration	Alkali-salz- Konzentration	Nitrat	Chlorid	Sulfat
10		—	0,686	—
1		0,687	0,726	0,712
0,1		0,717	0,738	0,720
0,01		0,743	0,749	0,721
1	1	0,695	0,760	0,725
0,1	1	0,732	0,790	0,754
0,01	1	0,761	0,817	0,780
0,1	0,1	0,723	0,751	0,732
0,01	0,01	0,749	0,749	0,738

Das auf die Einheitskonzentration der Lösungen bezogene Normalpotential gegen die Normal-Wasserstoffelektrode beträgt ε_h = — 0,40 Volt. Der Lösungsdruck des Cadmiums berechnet sich zu 10^7 Atmosphären.

Unter den zahlreichen Ketten mit Cadmium, deren elektromotorische Kräfte gemessen wurden, hat das Cadmium-Normalelement als Spannungsnormale in der Meßtechnik eine besondere Bedeutung erlangt. Ausgezeichnet durch einen sehr kleinen Temperaturkoeffizienten, hat dieses „Weston-

Element“ das früher vornehmlich verwendete, ganz analog zusammengesetzte Clark-Element (s. diesen Artikel unter „Zink“) allmählich fast ganz verdrängt. Es hat die Zusammensetzung

$$\underset{10-13\,\%\,Cd}{Cd_x\,Hg}\;\underset{fest}{CdSO_4 \cdot {}^8/_3 H_2O},\;\underset{gesättigt}{CdSO_4},\;\underset{fest}{Hg_2SO_4}\;Hg$$

Seine elektromotorische Kraft beträgt bei 20° 1,0186 Volt. Die Temperaturabhängigkeit ist dargestellt durch die Beziehung

$$EMK_t = 1{,}0186 - 0{,}0_438\,(t-20^0) - 0{,}0_665\,(t-20^0)^2 \text{ Volt.}$$

Ein zweiter, auch als Weston-Element bezeichneter Typ unterscheidet sich von jenem dadurch, das es kein festes $CdSO_4 \cdot {}^8/_3 H_2O$ enthält, sondern nur eine bei 4° gesättigte Cadmiumsulfatlösung. Die EMK dieses Elementes ist praktisch von der Temperatur unabhängig und beträgt konstant 1,0190 Volt.

Die Cadmiumelektrode ist umkehrbar, es gilt für den Elektrodenvorgang also die Helmholtzsche Gleichung $F\varepsilon = q + FT\frac{d\varepsilon}{dT}$. Wenn also ε, die Potentialdifferenz zwischen Metall und Lösung, und $\frac{d\varepsilon}{dT}$, der Temperaturkoeffizient derselben, bekannt sind, so kann man q, die Aenderung der inneren (chemischen) Energie des Vorganges, von Ostwald auch als Ionisierungswärme bezeichnet, berechnen. Lassen wir den Vorgang $Cd \rightarrow Cd^{\cdot\cdot}$ an 1 g-Atom metallischem Cadmium in äquivalent-normaler $CdSO_4$-Lösung bei 18° sich vollziehen, so haben wir, wenn wir die entsprechenden Werte in die Gleichung einsetzen:

$$2 \cdot 96540 \cdot 0{,}152 = q - 2 \cdot 96540 \cdot 291 \cdot 0{,}000658$$
$$q = 66290 \text{ Voltcoulomb}$$
$$= 15820 \text{ g-cal.}$$

Der Uebergang von 1 g-Atom Cd-Metall in 1 g-Atom $Cd^{\cdot\cdot}$-Ion in äquivalent-normaler $CdSO_4$-Lösung bei 18° ist also mit einer Abnahme der inneren Energie um 15820 g-cal verknüpft. Die insgesamt bei der umkehrbar und isotherm verlaufenden Auflösung von metallischem Cadmium zu Cadmiumsulfat unter den angegebenen Bedingungen an der Elektrode sich abspielenden Energieumwandlungen bestehen darin, daß aus 15820 g-cal chemischer Energie $2F\varepsilon = 7000$ g-cal elektrische Energie und $2FT\frac{d\varepsilon}{dT} = 8820$ g-cal thermische Energie (Wärmeabgabe an die Umgebung) gebildet werden.

Umgekehrt werden bei dem entgegengesetzten Vorgang $Cd^{\cdot\cdot} \rightarrow Cd$, der kathodischen Abscheidung von 1 g-Atom Cadmium aus dem Ionenzustande in normaler Cadmiumsulfatlösung 7000 g-cal elektrische und 8820 g-cal thermische Energie in 15820 g-cal chemische Energie verwandelt.

Das Cadmium ist in hohem Grade befähigt zur Bildung sowohl komplexer Kationen (z. B. mit NH_3) als auch komplexer Anionen wie $Cd(CN)_4''$, CdJ_3' usw. (s. Abschnitt 8d und e).

In wässeriger Lösung erleiden die Cadmiumsalze Hydrolyse, jedoch nur in geringem Grade, in 0,5 normaler $CdCl_2$- und CdJ_2-Lösung sind höchstens 0,05 %, in 0,5 normaler $CdSO_4$-Lösung 0,002 % der gelösten Salzmoleküle hydrolytisch zerspalten.

7. Nachweis und quantitative Bestimmung. Die meisten Cadmiumsalze sind weiß oder farblos, das Sulfid ist gelb gefärbt. Vor dem Lötrohre auf Kohle erhitzt, geben die Cadmiumverbindungen in der reduzierenden Flamme einen braunroten oder dunkelgelben Beschlag von CdO. Nitrat, Sulfat und die Halogenide sind in Wasser leicht löslich, die meisten anderen Cadmiumsalze unlöslich oder schwer löslich; von Mineralsäuren werden alle leicht gelöst. Die wässerigen Lösungen reagieren infolge von Hydrolyse sauer. Im gewöhnlichen Gang der Analyse wird Cadmium aus saurer Lösung durch Schwefelwasserstoff als gelbes Sulfid abgeschieden. Dieses wird von starken Säuren, besonders von Salpetersäure beim Erwärmen gelöst, in Schwefelalkali und in Cyankalium ist es unlöslich. Alkalilauge und Ammoniak fällen weißes Hydroxyd, das in kleinem Ueberschuß von Ammoniak leicht, in Alkalilauge dagegen nicht löslich ist; auch gesättigte K_2CO_3-Lösung löst das Hydroxyd auf. Alkali- und Ammoniumkarbonat scheiden basisches Cadmiumcarbonat aus. Mit Cyankalium wird $Cd(CN)_2$ gefällt; im Ueberschuß von Cyankalium ist dasselbe leicht löslich; Schwefelwasserstoff scheidet aus dieser Lösung alles Cadmium als Sulfid aus. Zink und Aluminium reduzieren Cadmiumsalzlösungen energisch; bei Gegenwart einer Spur von Chrom- und Kobaltnitrat ist die Fällung des Cadmiums durch Aluminium quantitativ.

Gewichtsanalytisch wird Cadmium am besten als CdO oder $CdSO_4$ bestimmt, aber auch CdS und $Cd_2P_2O_7$ (aus $CdNH_4PO_4$) eignen sich als Wägungsformen.

Die weitaus genaueste und bequemste Bestimmungsmethode ist jedoch die elektrolytische, und zwar kommt von den vielen dafür vorgeschlagenen Verfahren in erster Linie die Abscheidung aus cyankalischer Lösung in Betracht, doch können auch mit Cadimumsalzen organischer Säuren und, dank der hohen Ueberspannung der Wasserstoffentwicklung an Cadmiumkathoden, auch in schwefelsaurer Lösung gute Resultate erzielt werden. Auch zur Trennung von anderen Metallen können die elektroanalytischen Verfahren häufig mit Vorteil angewendet werden.

Spektrum. Ein Flammenspektrum geben Cadmiumsalze nicht, dagegen liefern ihre Lösungen, selbst sehr verdünnte, ein charakteristisches Funkenspektrum mit den Linien: (γ) 643,9 (orangegelb); 537,9; 533,8; 515,5; (α) 508,6 (grün); (β) 480,0; (δ) 467,8 (blau); 441,3 (indigoblau), von denen α, β und γ charakteristisch sind. Auch im Ultraviolett finden sich zahlreiche Linien. Ein Absorptionsspektrum liefern die Lösungen der Cadmiumsalze, da sie farblos sind, nicht.

8. Spezielle Chemie. 8a) Verhalten gegen Säuren, Basen, Salze, Gase usw. Chemisch reines Cadmium ist, ähnlich wie reines Zink, trotz seines gegen die Wasserstoffelektrode um rund 0,40 Volt positiveren Potentials infolge des sehr hohen Widerstandes, den die Wasserstoffentwicklung an ihm erfährt — die Ueberspannung des Wasserstoffs an Cadmium beträgt 0,48 Volt — in nichtoxydierenden verdünnten Säuren unlöslich, unreines Metall wird dagegen langsam unter Wasserstoffentwicklung gelöst; Platinchlorid beschleunigt die Auflösung. Mit Schwefelsäure entsteht bei höherer Temperatur nicht Wasserstoff sondern SO_2. Chlorsäure und Salpetersäure lösen ohne Wasserstoffentwicklung; aus der Salpetersäure werden dabei HNO_2, NO, N_2O, N_2 und NH_3 gebildet, die relative Menge dieser Produkte ist von der Konzentration der Säure abhängig. Wässerige schweflige Säure liefert, auch bei gleichzeitiger Gegenwart von H_2SO_4 und HCl, neben etwas Schwefel, Cadmiumsulfid als Zwischenprodukte der Reaktion sollen $CdSO_4$, $CdSO_3$, CdS_2O_3 und CdS_3O_6 auftreten.

Von wässerigen Alkalien wird Cd im Gegensatz zu Zink, das sich darin leicht auflöst, nur oberflächlich ein wenig angegriffen, bei Luftabschluß gar nicht. In eiskalter gesättigter Lösung von NH_4NO_3 löst sich Cd rasch ohne Gasentwickelung auf, die Lösung enthält neben etwas Ammoniak $Cd(NO_2)_2$ und NH_4NO_2. Auch geschmolzenes Ammoniumnitrat reagiert leicht mit Cd, wobei nach intermediärer Bildung von $Cd(NO_2)_2$ reiner Stickstoff entwickelt wird, und zwar 4 Atome Stickstoff auf 1 Atom Metall. Ziemlich leicht löslich ist Cd auch in wässerigen Lösungen von $K_2S_2O_8$ und $(NH_4)_2S_2O_8$.

Mit Wasser reagiert Cd bei gewöhnlicher Temperatur nicht, bei Gegenwart von Luft bedeckt es sich unter Wasser mit einer dünnen weißen Schicht von Hydroxyd. Wasserstoff wird von fein verteiltem Cadmium, wenn auch nicht in erheblicher Menge, absorbiert. An der Luft verliert das blanke Metall nach einigen Tagen seinen Glanz, in kohlensäurehaltiger Luft erhält es einen weißgrauen CO_2-haltigen Ueberzug. Beim Schütteln fein verteilten Cadmiums in mit Sauerstoff gefüllten Flaschen bei Gegenwart von wässerigem Ammoniak erfolgt langsame Oxydation des Metalls. Ozon wirkt auf Cd nicht wesentlich energischer als Sauerstoff. Der braune Rauch, der sich beim Verbrennen des Cadmiums entwickelt, enthält neben CdO auch Cadmiumsuperoxyd. Im elektrischen Lichtbogen entsteht ein voluminöses schwarzes Pulver, das Cadmiumnitrid enthält. NO wirkt nur oberflächlich oxydierend auf Cadmium ein; in N_2O auf 300° erhitzt, oxydiert sich das fein verteilte Metall allmählich und verflüchtigt sich. Beim Erhitzen mit CO im zugeschmolzenen Rohr auf 550° wird CO_2 und C gebildet. Im SO_2-Strom erhält man beim Glühen CdS und $CdSO_4$. Trockenes Chlor ist bei gewöhnlicher Temperatur ohne Einwirkung, trocknes Salzsäuregas wird beim Erhitzen im Einschmelzrohr vollständig zerlegt.

8b) Einfache Salze und Verbindungen. Cadmiumhydrid. Ob Cd mit Wasserstoff eine Verbindung bildet, ist nicht mit Sicherheit bekannt.

Metallverbindungen. Cadmium legiert sich mit vielen Metallen, mit einigen bildet es wohlcharakterisierte Verbindungen. Nachgewiesen sind folgende Metallverbindungen: Cu_2Cd_3; Au_4Cd_3, $AuCd_3$; MgCd; Sb_2Cd_3, SbCd; $NiCd_4$; $NaCd_2$, $NaCd_5$.

Cadmiumfluorid, CdF_2, entsteht durch Umsetzung neutraler Cadmiumsalze mit KF in Form eines feinkörnigen Kristallpulvers oder durch Einwirkung von HF-Gas auf Cd oder CdO bei Rotglut. Es schmilzt über 1000° und ist bei 1200° noch nicht flüchtig. In Wasser ist es wenig (0,29 g-Mol im Liter bei 25°), in verdünnten Säuren leicht löslich. Bildungswärme bei 18°: $Cd + 2F + aq = CdF_2 . aq + 127700$ g-cal.

Cadmiumchlorid, $CdCl_2$, kann in kristallisiertem Zustande wasserfrei, sowie als Mono-, Di-, Tetra- und Pentahydrat erhalten werden. Wasserfrei bildet es nach der Sublimation perlmutterartig glänzende Blättchen. Es schmilzt bei 563° und siedet bei 964°. Spezifisches Gewicht $d_4^{25} = 4{,}047$; spezifische Wärme bei 0—30°: 0,09362; Löslichkeit bei 25°: 52,9 g in 100 g Lösung; auch in Methyl- und Aethylalkohol, Aceton und Aethylacetat ist $CdCl_2$ löslich. Das Monohydrat wird erhalten durch Fällen konzentrierter $CdCl_2$-Lösung mittels HCl oder H_2SO_4 sowie beim Verdampfen der Lösung bei höherer Temperatur, es kristallisiert in langen Nadeln. Das Dihydrat bildet sich beim Verdunsten der Lösung bei gewöhnlicher Temperatur, es kristallisiert monoklin; der Umwandlungspunkt der beiden Hydrate liegt bei etwa 34°. Tetra- und Pentahydrat bilden sich bei niederen Temperaturen.

Bildungswärme nach Thomsen:

$Cd + 2\,Cl = CdCl_2 + 93240$ g-cal.

$Cd + 2Cl + 2H_2O = CdCl_2 . 2H_2O + 95490$ g-cal.

Lösungswärme bei 18°:

$CdCl_2 \longrightarrow CdCl_2 . 400H_2O: + 3010$ g-cal.

$CdCl_2 . 2H_2O \longrightarrow CdCl_2 . 400H_2O: + 760$ g-cal.

Geschmolzenes $CdCl_2$ leitet den elektrischen Strom sehr gut. Die wässerigen Lösungen sind mäßig dissoziiert, mit Zunahme der Konzentration nimmt die Dissoziation sehr rasch ab. Die einerseits aus Leitfähigkeits-, andererseits aus Gefrierpunktsmessungen für das Dissoziationsschema $CdCl_2 \rightleftharpoons Cd^{\cdot\cdot} + 2Cl'$ berechneten Dissoziationsgrade zeigen starke Abweichungen, erst bei größeren Verdünnungen nähern sich die Werte. Die Ursache ist in der Neigung des $CdCl_2$ zur Komplexbildung zu suchen. Die Tatsache, daß $CdCl_2$ die Löslichkeit von $PbCl_2$ und TCl viel weniger erniedrigt als andere ternäre Chloride, sowie die Ergebnisse von Potentialmessungen an Konzentrationsketten und ganz besonders die für Lösungen verschiedener Konzentration erhaltenen Ueberführungszahlen (vgl. Abschnitt 6) bestätigen das Vorhandensein komplexer Anionen in den $CdCl_2$-Lösungen. Die Zersetzungsspannung von $CdCl_2$ beträgt 1,88 Volt.

Cadmiumbromid, $CdBr_2$, entsteht beim Erhitzen von Cd in Bromdampf oder beim Kochen der beiden Elemente mit Wasser. Es kann wasserfrei und in mehreren Hydratstufen auftreten. Wasserfrei schmilzt es bei 580°, siedet bei 863° und sublimiert in weißen perlglänzenden Blättchen.

Spezifische Wärme bei 30 bis 0°: 0,06561. Spezifisches Gewicht $d^{1}_{4}{}^{5} = 5{,}196$. Löslichkeit in Wasser bei 25°: 52,6%. Auch in Alkohol, Aceton und Aether ist $CdBr_2$ löslich.

Von Hydraten sind besonders $CdBr_2 . H_2O$ und $CdBr_2 . 4\,H_2O$ bekannt, ihr Umwandlungspunkt liegt bei etwa 36°. Letzteres bildet leicht verwitternde Nadeln, bei 145° verliert es alles Wasser.

Bildungswärme:

$Cd + 2\,Br = CdBr_2 + 75200$ g-cal (Thomsen)
$+ 76300$ g-cal (Nernst).

Lösungswärme:

$CdBr_2 \longrightarrow CdBr_2 . 400\,H_2O + 440$ g-cal.

$CdBr_2 4H_2O \longrightarrow CdBr_2 . 600\,H_2O - 7300$ g-cal.

Geschmolzenes Cadmiumbromid leitet den elektrischen Strom gut.

In wässeriger Lösung ist $CdBr_2$ noch stärker assoziiert als $CdCl_2$ (vgl. Abschnitt 6).

Cadmiumjodid, CdJ_2, ist in festem Zustande bisher nur wasserfrei erhalten worden. Es kann auf trockenem Wege oder auch in Gegenwart von Wasser aus den beiden Komponenten oder auch aus Cd oder CdO und Jodwasserstoff erhalten werden. Es kristallisiert in ziemlich großen, diamantglänzenden hexagonalen Blättern. Sein Schmelzpunkt liegt bei 404°, der Siedepunkt bei 708—719°; als Dampf ist es partiell dissoziiert und leitet die Elektrizität. Das spezifische Gewicht beträgt $d^{12}_{4} = 5{,}9857$ In Wasser ist es leicht löslich, bei 18° lösen sich 46,02%; auch in allerlei nichtwässerigen Flüssigkeiten, Methyl-, Aethyl- und Propylalkohol, Aceton, Methylacetat, Pyridin, Methylsulfid u. a. ist es, seiner starken Assoziationstendenz entsprechend, in ziemlich erheblicher Menge löslich.

Bildungswärme: $Cd + J_2 = CdJ_2 + 48800$ g-cal.

Lösungswärme: $CdJ_2 \longrightarrow CJ_2 . 400\,H_2O - 960$ g-cal.

Geschmolzen leitet es den elektrischen Strom sehr gut. In wässeriger Lösung ist es in hohem Grade komplex. In sehr konzentrierten Lösungen sind fast ausschließlich nur komplexe Molekeln vorhanden. In 0,1 normaler Lösung ist es erst zu etwa einem Fünftel dissoziiert, fast die Hälfte der Ionen ist als CdJ'_3 vorhanden (vgl. Abschnitt 6).

Cadmiumcyanid, $Cd(CN)_2$ wird aus konzentrierter Lösung eines Cadmiumsalzes durch Fällung mit Kaliumcyanid oder durch Eindampfen der Lösung von $Cd(OH)_2$ in Cyanwasserstoffsäure, in letzterem Falle in Form luftbeständiger, wasserfreier Kristalle, erhalten. Es ist in Wasser nur sehr wenig, in KCN-Lösung dagegen sehr leicht unter Komplexbildung (vgl. Abschnitt 8e) löslich; durch Säuren wird es zersetzt.

Cadmiumoxyd, CdO, entsteht beim Verbrennen von Cadmium an der Luft oder durch Glühen von Hydroxyd, Carbonat, Oxalat und Nitrat als braungelbes oder braunrotes Pulver. In der Natur findet es sich auf sardinischem Galmei in oktaedrischen Kristallen, in ähnlichen Formen kann es auch künstlich durch Glühen von Cadmiumnitrat erhalten werden; amorphes CdO geht im Sauerstoffstrom bei Weißglühhitze in dunkelrote kubische Kristalle über. Spezifisches Gewicht des natürlichen Oxyds 6,15, des künstlichen 8,11. Es ist unschmelzbar und selbst in starker Weißglühhitze vollkommen beständig. Säuren lösen es leicht zu den betreffenden Salzen. Chlor verwandelt es bei Rotglut in $CdCl_2$. Kohle reduziert es bei schwacher Glühhitze. Im Wasserstoffstrom tritt oberhalb 270° lebhafte Reduktion ein.

Cadmiumhydroxyd, $Cd(OH)_2$, entsteht bei der Fällung von Cadmiumsalzlösungen mittels Alkalilauge als weißer amorpher Niederschlag, unter besonderen Umständen kann es auch kristallisiert in Form perlmutterglänzender Blättchen erhalten werden. Spezifisches Gewicht $d_{15} = 4{,}79$. Beim Erhitzen auf 300° gibt es sein Wasser ab.

In Alkalilauge ist $Cd(OH)_2$ praktisch unlöslich, von Ammoniak wird es unter Komplexbildung gelöst. Auf die Bildung von Komplexen ist es auch zurückzuführen, daß $Cd(OH)_2$ sich auch in Alkalihalogeniden und -rhodaniden auflöst, wobei freies Alkali entsteht.

Bildungswärme: $Cd + O + H_2O = Cd(OH)_2 + 65700$ g-cal.

Für die Neutralisationswärme wurde gefunden:

$Cd(OH)_2$	$+ 2HF$, aq	: 25560	g-cal.
,,	$+ 2HCl$, aq	: 20290	,,
,,	$+ 2HBr$, aq	: 21560	,,
,,	$+ 2HJ$, aq	: 24210	,,
,,	$+ 2HCN$, aq	: 13700	,,
,,	$+ H_2SO_4$, aq	: 24200	,,
,,	$+ 2HNO_3$, aq	: 20240	,,

Cadmiumsulfid, CdS, kommt als Mineral (Greenockit) in honiggelben, stark lichtbrechenden hexagonalen Kristallen vor; diese können auch künstlich auf verschiedenen Wegen erhalten werden: aus $CdCl_2$ und H_2S oder CdO und S bei Rotglühhitze, beim Erhitzen von amorphem CdS im elektrischen Ofen, aus der Schmelze von CdS $+ S + K_2CO_3$. Amorphes CdS bildet sich beim Fällen von Cadmiumsalzlösungen durch Schwefelwasserstoff oder Alkalisulfide oder in essigsaurer Lösung durch Natriumthiosulfat, und bei der Auflösung von Cd in wässeriger schwefliger Säure. CdS soll in 2 Modifikationen auftreten, einer gelben, die in hexagonalen Tafeln mit dem spezifischen Gewicht 3,906, und einer roten, die in hexagonalen, tesseralen und monoklinen Formen mit dem spezifischen Gewicht 4,513 kristallisiert. CdS verflüchtigt sich im Vakuum unter Zersetzung bei 770—780°, beim Ueberleiten von Cd-Dampf sublimiert es bei Rotglut unzersetzt, im H-Strom kann es nicht ohne Verlust an Metall geglüht werden. An feuchter Luft geht es im Sonnenlicht in $CdSO_4$ über. In verdünnten Säuren ist es fast unlöslich, ebenso in KCN-Lösung; Lösungsmittel sind Salpetersäure und konzentrierte Salzsäure. Frisch gefällt ist es in Alkalisulfiden ein wenig, in Schwefelammonium dagegen in beträchtlicher Menge löslich, ob dabei Komplexe oder kolloidales CdS entstehen, ist noch nicht sicher entschieden.

Bildungswärme: $Cd + S + aq = CdS, aq + 34400$ g-cal.

Auch ein Selenid, Tellurid, Nitrid, Arsenid und mehrere Phosphide sind bekannt.

Cadmiumchlorat bildet prismatische Kristalle von der Zusammensetzung $Cd(ClO_3)_2 . 2\,H_2O$; Cadmiumbromat rhombische Kristalle von der Zusammensetzung $Cd(BrO_3)_2 . H_2O$; beide sind in Wasser sehr leicht löslich. Cadmiumjodat tritt in kleinen prismatischen Kristallen, $Cd(JO_3)_2 . H_2O$, auf, die in Wasser sehr wenig löslich sind. Auch einige Perjodate sind bekannt.

Cadmiumsulfat, $CdSO_4$, kann in kristallisiertem Zustande als Anhydrid und in verschiedenen Hydratstufen auftreten, sicher nachgewiesen sind davon $CdSO_4 . H_2O$, $CdSO_4 . {}^8/_3\,H_2O$ und $CdSO_4 . 7\,H_2O$. Das Anhydrid erhält man aus der Lösung in starker Schwefelsäure in orthorhombischen Prismen, $d_{15} = 4{,}72$; das Monohydrat scheidet sich aus der siedend gesättigten Lösung von $CdSO_4$ bei Zusatz von Schwefelsäure in monoklinen Kristallen aus, $d_{15} = 3{,}786$; $CdSO_4 . {}^8/_3\,H_2O$ wird durch freiwilliges Verdunsten der gesättigten Lösung in Form luftbeständiger, monokliner Kristalle, $d_{15} = 2{,}939$, erhalten, seine spezifische Wärme bei 17° ist 0,2225; das Heptahydrat bildet sich bei —16° aus dem durch Abkühlung einer bei 70° gesättigten Lösung entstehenden Kryohydrat, es scheint mit Eisenvitriol isomorph zu sein.

Cadmiumsulfat neigt stark zur Bildung übersättigter Lösungen, die Löslichkeit von $CdSO_4\,{}^8/_3\,H_2O$ beträgt bei 20° 43,37 g in 100 g Lösung.

Die Lösungswärme bestimmte Thomsen zu:

$CdSO_4 . {}^8/_3\,H_2O \rightarrow CdSO_4, 400\,H_2O + 2660$ g-cal.
$CdSO_4 . H_2O \rightarrow CdSO_4, 400\,H_2O + 6050$ g-cal.
$CdSO_4 \rightarrow CdSO_4, 400\,H_2O + 10740$ g-cal.

Bildungswärme: $Cd + S + 4\,O = CdSO_4 + 222550$ g-cal.

In wässeriger Lösung ist $CdSO_4$ sehr stark komplex und zwar schon bei geringen Konzentrationen. Die Verhältnisse liegen hier ganz ähnlich wie bei den Halogenverbindungen.

Bezüglich der elektrischen Potentiale sei auf Abschnitt 6 verwiesen, wo auch das für die Meßtechnik wichtige Cadmium-Normalelement beschrieben ist.

Die Zersetzungsspannung des Cadmiumsulfats beträgt 2,03 Volt.

Cadmiumsulfit, $CdSO_3$, ist wasserfrei und in mehreren Hydratstufen (mit ${}^3/_2$, 2 und 3 Mol. Wasser) in Form feinkörnig kristallinischer Pulver bekannt; in Wasser ist es schwer löslich.

Cadmiumthiosulfat, $CdS_2O_3 . 2H_2O$, monokline Kristalle.

Cadmiumselenat, $CdSeO_4 . 2H_2O$, kristallisiert rhombisch.

Cadmiumselenit, $CdSeO_3$, orthorhombische Kristalle; das Hydrat $CdSeO_3 . {}^3/_2\,H_2O$ bildet ein amorphes Pulver; es existieren auch gut charakterisierte saure Salze.

Cadmiumnitrat wird gewöhnlich als Tetrahydrat, $Cd(NO_3)_2 . 4H_2O$ erhalten (außerdem existieren Hydrate mit 1, 2 und 9 Mol. H_2O); es kristallisiert in strahlig vereinigten

Säulen und Nadeln, die an der Luft zerfließen. Es schmilzt bei 59,5° und siedet bei 132°. Spezifisches Gewicht $d_4^{20} = 2,460$.

Die Löslichkeit in Wasser beträgt bei 18° 55,90 g $Cd(NO_3)_2.4\,H_2O$ in 100 g Lösung; auch in organischen Flüssigkeiten, Alkohol, Aethylacetat, Pyridin, ist das Nitrat löslich.

Bildungswärme: $Cd + 2N + 6O + 4H_2O = Cd(NO_3)_2.4\,H_2O + 121200$ g-cal.

Lösungswärme: $Cd(NO_3)_2.4H_2O \rightarrow Cd(NO_3)_2, 400H_2O - 5040$ g-cal.

In wässeriger Lösung ist es ziemlich stark dissoziiert, läßt aber doch die Neigung der Cadmiumsalze zur Komplexbildung noch deutlich erkennen.

Die Zersetzungsspannung beträgt 1,98 Volt.

Cadmiumnitrit ist sehr unbeständig und geht leicht in das basische Salz $Cd(NO_2)_2.CdO$ über.

Cadmiumphosphate. Das Orthophosphat erhält man durch Fällung von Cadmiumsalzlösungen mittels Na_2HPO_4, es ist jedoch infolge von Hydrolyse meist mit basischen Produkten vermischt; leichter werden bei Gegenwart freier Phosphorsäure saure Salze wie $Cd_3(PO_4)_2 2CdHPO_4.4H_2O$ und $CdH_4(PO_4)_2.2H_2O$ erhalten, das erstere bildet monokline Säulen, das zweite große rhombische Prismen. Das Pyrophosphat, $Cd_2P_2O_7$, entsteht beim Glühen aus der Verbindung NH_4CdPO_4, die ihrerseits aus ammoniakalischer Cadmiumsalzlösung mittels Na_2HPO_4 als Monohydrat quantitativ ausgeschieden wird.

Cadmiumarsenate werden gewöhnlich als saure Salze, $CdHAsO_4.H_2O$, $Cd_5H_2(AsO_4)_4.4H_2O$ oder $CdH_4(AsO_4)_2.2H_2O$ erhalten. Das Pyroarsenat $Cd_2As_2O_7$ entsteht beim Glühen von NH_4CdAsO_4.

Cadmiumborat, $Cd_3B_2O_6$ bildet sich in der Schmelze von CdO und B_2O_3 in KHF_2; durch Fällen von $CdSO_4$ mit Borax entsteht $Cd_3B_4O_9.3H_2O$.

Cadmiumcarbonat, $CdCO_3$, entsteht durch Fällung von Cadmiumsalzlösungen mittels Alkalicarbonat, es enthält, so dargestellt, immer Hydroxyd. Löst man jedoch die so erhaltenen amorphen Produkte in der Hitze in NH_4Cl- oder $(NH_4)_2CO_3$-Lösung, so bilden sich kleine rhomboedrische Kristalle von reinem $CdCO_3$ mit $d_{15} = 4,960$. Auch in der Natur kommt in kleinen Rhomboederchen kristallisiertes $CdCO_3$ unter den Namen Otavit vor. Bei Rotglut entsteht braunschwarzes CdO unter Erhaltung der Kristallumrisse.

Bildungswärme: $Cd + C + 3O = CdCO_3 + 181900$ g-cal.

$CdO + CO_2 = CdCO_3 + 84930$ g-cal.

Cadmiumacetat scheidet sich aus den Lösungen als Dihydrat, $Cd(CH_3COO)_2.2H_2O$ in Form monokliner Kristalle mit dem spezifischen Gewicht 2,010 ab; es ist in Wasser sehr leicht löslich. Wie alle Cadmiumsalze ist es in wässeriger Lösung stark komplex.

Cadmiumoxalat scheidet sich als Trihydrat $CdC_2O_4.3H_2O$ beim Fällen von $CdCl_2$-Lösung mittels Oxalsäure oder oxalsaurem Ammonium in der Kälte in kleinen dünnen Tafeln, in der Hitze in großen prismatischen Kristallen aus. Schon bei 100° gibt es sein Wasser ab; $d_{18} = 3,320$. Bei der Zersetzung durch Erhitzen soll Cadmiumsuboxyd entstehen. In Wasser ist es sehr schwer löslich (1 Gewichtsteil in 13000 Teilen kaltem Wasser) und kann deshalb zur quantitativen Abscheidung des Cadmiums verwendet werden.

8c) Basische Salze. Von den in der Literatur beschriebenen basischen Salzen des Cadmiums dürfte nur eine verhältnismäßig kleine Anzahl wirklich chemische Individuen darstellen. Sicher nachgewiesen ist u. a. die Existenz folgender Oxysalze:

Cadmiumoxychlorid, $CdCl(OH)$, bildet sich bei anhaltendem Einhitzen von $CdCl_2$-Lösung mit $CaCO_3$ auf 200° oder beim Fällen konzentrierter $CdCl_2$-Lösung mit verdünntem Ammoniak; es bildet kleine hexagonale Prismen, die bei 280° nur einen kleinen Teil Wasser, den Rest erst beim Glühen abgeben; von Wasser wird es langsam zerlegt. Außerdem existiert eine Verbindung $2CdO.CdCl_2$.

Cadmiumoxybromid, $CdBr(OH)$, wird auf dieselbe Weise wie das Oxychlorid in Form dünner Blättchen erhalten. Auch ein Hydrat $CdBr(OH).H_2O$ ist bekannt.

Cadmiumoxyjodid, $CdJ(OH)$, bzw. das Hydrat $CdJ(OH).H_2O$ wird aus verdünnten Lösungen von CdJ_2 durch verdünntes Ammoniak gefällt.

Cadmiumoxycyanid, $Cd_3(CN)_4(OH)_2.4\,H_2O$, bildet sich bei der Einwirkung verdünnter Blausäure auf $Cd(OH)_2$ oder $Cd(CN)_2$.

Cadmiumoxysulfat, $Cd_2(SO_4)(OH)_2$, erhält man in Form trikliner Nadeln durch Glühen von $CdSO_4.H_2O$ oder durch Kochen der Lösung von Cadmiumsulfat mit $^1/_3$ der zur vollständigen Fällung erforderlichen Menge Kalilauge.

Cadmiumoxynitrat, $CdNO_3OH.H_2O$, entsteht beim Kochen von $Cd(NO_3)_2$-Lösung mit $Cd(OH)_2$ oder auch durch vorsichtiges Erhitzen des Nitrats; es bildet scheinbar rhombische Täfelchen; bei 120—130° verliert es 1 Mol. H_2O.

8d) Additionsverbindungen (Salzen mit komplexem Kation). Das Cd''-Ion besitzt eine starke Neigung, durch Addition allerlei neutraler Stoffe wie Ammoniak, substituierter Ammoniakmolekeln, Hydrazin, Pyridin, Aethylsulfid usw. komplexe Kationen $(Cd.nX)^{\cdot\cdot}$ zu bilden. Die Anzahl der addierten Neutralteile beträgt meist 2, oft

auch mehr; als Höchstzahl ist 6 beobachtet worden. Die Zahl der bekannten Additionsverbindungen des Cadmiums ist außerordentlich groß, die Kenntnis ihrer Existenzbedingungen sowie ihres Zustandes in wässeriger Lösung ist für weitaus die meisten noch sehr gering, von manchen ist nicht vielmehr als die Formel bekannt. Wir müssen uns hier auf einige allgemeine Angaben beschränken.

Von den Ammoniakverbindungen sind am vollständigsten, auch vom physikalisch-chemischen Standpunkte, die Chloride untersucht. In fester Form sind dargestellt worden: $Cd(NH_3)Cl_2$, $Cd(NH_3)_2Cl_2$, $Cd(NH_3)_3Cl_2 . 1/4\,H_2O$, $Cd(NH_3)_4Cl_2 . 1/2\,H_2O$ (diese Verbindung existiert auch wasserfrei), $Cd(NH_3)_5Cl_2$ und $Cd(NH_3)_6Cl_2$. Die unter gewöhnlichen Bedingungen stabilste dieser Verbindungen scheint $Cd(NH_3)_2Cl_2$ zu sein. Einige kristallisieren in wohlausgebildeten Formen, andere treten in Form eines Kristallpulvers auf. Der Grad ihrer Beständigkeit wird aus den NH_3-Dampfdrucken der verschiedenen Verbindungen ersichtlich.

Für die NH_3-Dampfdrucke in mm Hg wurde bei t° gefunden:

	20°	78°	216°
$Cd(NH_3)Cl_2$	2,0 mm	—	4,53 mm
$Cd(NH_3)_2Cl_2$	24,6 „	—	361,1 „
$Cd(NH_3)_4Cl_2$	100,5 „	1002 mm	—
$Cd(NH_3)_6Cl_2$	331,0 „	—	

Die Dissoziationswärmen betragen für

$Cd(NH_3)Cl_2 = CdCl_2 + NH_3$: 22880 g-cal.
$Cd(NH_3)_2Cl_2 = Cd(NH_3)Cl_2 + NH_3$: 18610 „
$Cd(NH_3)_4Cl_2 = Cd(NH_3)_2Cl_2 + 2NH_3$: 12240 „
$Cd(NH_3)_6Cl_2 = Cd(NH_3)_4Cl_2 + 2NH_3$: 10690 „

Aehnliche Verbindungen sind dargestellt worden von Bromid, Jodid, Cyanid, Sulfocyanid, Bromat, Jodat, Sulfat, Nitrat, Oxalat und anderen Cadmiumsalzen.

Auch die Tatsache, daß CdO bzw. $Cd(OH)_2$ in wässerigem Ammoniak sich auflöst, ist auf Bildung eines komplexen Kations zurückzuführen, und zwar lassen Messungen der EMK an Konzentrationsketten schließen auf $[Cd(NH_3)_4]^{··}$.

Außerordentlich groß ist die Zahl der Additionsverbindungen der Cadmiumsalze mit organischen Stoffen, besonders bei den Haloidverbindungen, doch sind auch solche von Sulfat, Sulfit, Thiosulfat, Acetat, Nitrat usw. bekannt. Man kennt Verbindungen mit Alkylaminen, Anilin und Homologen, Phenylhydrazin, Pyridin und Homologen, Piperidin, Chinolin, Harnstoff, Thioharnstoff, Alkylsulfiden u. a.

8e) Doppel- und Komplexsalze. Beim Einleiten von HCl-Gas in eine kaltgesättigte $CdCl_2$-Lösung erhält man Kristalle einer ziemlich unbeständigen Verbindung $CdCl_2 . 2HCl . 7H_2O$. Daß man es hier mit einer wenigstens teilweise komplexen Säure, vielleicht H_2CdCl_4 zu tun hat, kann aus der Beobachtung geschlossen werden, daß die sofort bestimmte Gefrierpunktserniedrigung der Lösung größer ist als die nach einiger Zeit gemessene, also wohl eine in meßbarer Zeit erfolgende Komplexbildung stattfindet. In analoger Weise kann man Kristalle von $H_2CdBr_4 . 7\,H_2O$ und $HCdJ_3 . 3H_2O$ erhalten. Von diesen Säuren leiten sich eine Reihe von Salzen ab, z. B.:

$KCdCl_3 . H_2O$	$KCdBr_3 . H_2O$	$KCdJ_3 . H_2O$
K_4CdCl_6	$NaCdBr_3 . 5/2 H_2O$	K_2CdJ_4
$Na_2CdCl_4 . 3H_2O$	Na_4CdBr_6	$NaCdJ_3$
NH_4CdCl_3	$NH_4CdBr_3 1/2 H_2O$	Na_2CdJ_4
$(NH_4)_4CdCl_6$	$(NH_4)_4CdBr_6$	NH_4CdJ_3 u. a.

Doppelverbindungen mit substituierten Ammoniumsalzen können in sehr verschiedenen Typen auftreten, auch von zweiwertigen Metallen Mg, Ca, Ni, Co, Mn, Fe, Cu existieren solche Doppelverbindungen. Daß die Lösungen dieser Salze Komplexionen enthalten, ist nach Gefrierpunkts- und Leitfähigkeitsmessungen sehr wahrscheinlich. Besonders bei den Jodiden kann darüber kein Zweifel bestehen; schon Hittorf konnte durch Ueberführungsmessungen feststellen, daß in konzentrierten Lösungen von Kaliumcadmiumjodid ein erheblicher Teil des Cadmiums zur Anode wandert. Aus Messungen von Leitfähigkeit, Ueberführungszahl und Gefrierpunktserniedrigung ergibt sich, daß eine 0,025 normale Kaliumcadmiumjodidlösung 39% des Cadmiums als CdJ'_3-Ion enthält. Auch Doppelfluoride, K_2CdF_4 und NH_4CdF_3 sind bekannt. Von den Doppelcyaniden des Cd ist besonders $K_2(Cd(cn)_4)$ eingehender untersucht worden; es kristallisiert in luftbeständigen Oktaedern und ist in Wasser leicht löslich. Nach Ueberführungs- und Potentialmessungen ist es in hohem Grade komplex; die Komplexbeständigkeit ist jedoch nicht sehr erheblich, verdünnte Säuren wirken zersetzend, Schwefelwasserstoff fällt infolge des sehr kleinen Löslichkeitsproduktes des CdS das Cd quantitativ aus. Auch Na-, Ba-, Sr- und Ca-Doppelcyanide sind in fester Form erhalten worden. Weiter kennt man Cadmiumdoppelrhodanide, die verschiedenen, teils sehr komplizierten Typen angehören, sowie auch gemischte Halogenorhodanide wie z. B. $K_2CdCl_2(CNS)_2$; diese scheinen nur wenig komplex zu sein.

Einen ebenfalls nur geringen Grad von Komplexität weisen die gewöhnlich in sehr schön ausgebildeten monoklinen Kristallen auftretenden Cadmiumdoppelsulfate auf. Die Doppelsulfate mit K, Rb, Cs, NH_4, Mg treten als Hexahydrate auf, von $K_2Cd(SO_4)_2$ sind außerdem ein Di-, Tri- und Tetrahydrat bekannt, das Na-Salz kristallisiert mit

$2 H_2O$. Mit Ferrosulfat bildet $CdSO_4$ eine isodimorphe Reihe $CdFe(SO_4)_2 . {}^{16}/_3 H_2O$ und $CdFe(SO_4)_2 . 14 H_2O$, desgleichen mit Kupfersulfat $CdCu(SO_4)_2 \, {}^{16}/_3 H_2O$ und $CdCu(SO_4)_2 . 10 H_2O$. Auch mit Mangansulfat mischt $CdSO_4$ sich gut; die Kristalle enthalten $4 H_2O$ und sind isomorph mit $MnSO_4 . 4 H_2O$.

Außerdem sind zahlreiche Doppelverbindungen bekannt von Sulfiten, Thiosulfaten, Selenaten, Nitriten, Phosphaten, Arsenaten.

Von Doppelsalzen des Cd mit organischen Säuren sind namentlich zu nennen die Verbindungen mit K-, Na- und NH_4-Oxalat; auch Cadmiumdoppeltartrate, -thioglykolate und -formiate sind bekannt.

Kolloidchemie des Cadmiums. Kolloidales Cadmiummetall wird durch kathodische Zerstäubung von Cadmiumstäben im elektrischen Lichtbogen unter Luftabschluß in stark gekühltem Leitfähigkeitswasser als tiefbraune Flüssigkeit gewonnen. Bei Luftabschluß ist das Hydrosol sehr beständig, bei Luftzutritt wird es dagegen rasch oxydiert. Durch Elektrolyse wird es, wie alle Metallhydrosole, unter Farbumschlag von Braun in Blaugrau gelatiniert. Säuren verwandeln es bei Zusatz von H_2O_2, Salpetersäure und schwefelige Säure auch ohne diesen in die betreffenden Metallsalzlösungen; aus der Lösung in H_2SO_3 fällt infolge Zersetzung des sich zunächst bildenden Hydrosulfits bald CdS aus.

Das Isobutylalkosol wurde mit Hilfe des elektrischen Funkens unter Zwischenschaltung einer mit dem Alkohol bedeckten losen Schicht von Metallteilchen zwischen die Pole der Sekundärleitung eines Funkeninduktoriums als unbegrenzt haltbare, im durchgehenden Licht braune, im auffallenden Licht grauschwarze Flüssigkeit erhalten.

Das Hydrosol des Cadmiumsulfid entsteht, wenn man das aus ammoniakalischer Cadmiumsulfatlösung mittels Schwefelwasserstoff gefällte Gel nach sorgfältigem Auswaschen in Wasser suspendiert und erneut Schwefelwasserstoff einleitet, bis das ursprünglich grobflockige Gel peptisiert ist, oder einfacher beim Einleiten von Schwefelwasserstoff in sehr stark verdünnte Kaliumcadmiumcyanid- oder auch Cadmiumsulfatlösung. Es ist eine schön goldgelbe, im durchfallenden Licht vollkommen klare, im auffallenden Licht stark opaleszierende Flüssigkeit, die die violetten, blauen und grünen Strahlen des Spektrums absorbiert, die übrigen dagegen ungeschwächt durchläßt. Alle Elektrolyte verwandeln das Hydrosol in das Gel, auch nach längerem Stehen tritt Gelbildung ein. Im elektrischen Potentialgefälle wandert das kolloidale Cadmiumsulfid nach der Anode. Auch bei der Diffusion von Cadmiumsalzlösung in mit Natriumsulfid versetzte Gelatine, erhält man eine völlig klare, goldgelbe Schicht von kolloidalem Cadmiumsulfid.

Literatur. *C. Drucker, Cadmium. In Abeggs Handbuch der anorganischen Chemie, Bd. II 2, Leipzig 1905. — W. Roth, Cadmium. In Gmelin, Kraut, Friedheim und Peters' Handbuch der anorganischen Chemie, Bd. IV 1, Heidelberg 1911.*

C. Tubandt.

h) Quecksilber.

Hg. Atomgewicht 200,6.

1. Vorkommen. 2. Geschichte. 3. Darstellung. 4. Verwendung. 5. Physikalische Eigenschaften und Konstanten. 6. Elektrochemie. 7. Nachweis und quantitative Bestimmung. 8. Spezielle Chemie: a) Verhalten gegen Säuren, Salze, Gase usw. b) Amalgame. c) Mercuroverbindungen. d) Mercuriverbindungen. e) Komplex- und Doppelsalze. 9. Thermochemie. 10. Kolloidchemie.

1. Vorkommen. Das Quecksilber (Atomgewicht Hg=200,6) kommt in der Natur hauptsächlich in Verbindung mit Schwefel als roter kristallinischer Zinnober HgS, neben anderen Sulfiden in manchen Fahlerzen vor; in kleinen Mengen findet man es auch in metallischem Zustande in Form kleiner Tröpfchen in Gesteinsmassen eingesprengt. Die wichtigsten Quecksilberlagerstätten sind die von Almaden in Spanien, Idria in Krain, Moschellandsberg in der Rheinpfalz und Neu-Almaden in Californien.

2. Geschichte. Zinnober war bereits den Alten bekannt, auch metallisches Quecksilber sowie seine Darstellung aus Zinnober wird schon von Theophrast (um 300 v. Chr.) erwähnt. Im alchemistischen Zeitalter wurde das Quecksilber oder ein ihm ähnlicher und ebenso bezeichneter Körper als Bestandteil aller Metalle, als Ursache des Metallglanzes, der Dehnbarkeit, der metallischen Beschaffenheit überhaupt angesehen und hat demgemäß bei den auf die Metallverwandlung gerichteten Bestrebungen der Alchemisten eine besonders wichtige Rolle gespielt. Darauf sowie auf das Bekanntwerden der kräftigen Heilwirkungen der Quecksilberpräparate (15. Jahrhundert) ist es zurückzuführen, daß sehr viele Verbindungen des Quecksilbers verhältnismäßig früh bekannt geworden sind. Auch bei der Entwickelung der neueren Chemie (um 1800) hat das Quecksilber vielfach wieder eine wichtige Rolle gespielt, so bei der Aufklärung der Oxydationserscheinungen, bei der Untersuchung der Gase (Quecksilberwanne) u. a.

3. Darstellung. Die Darstellung des Quecksilbers bildet einen der einfachsten hüttenmännischen Prozesse. Das Sulfid, das hierfür fast ausschließlich in Frage kommt, setzt sich bei hoher Temperatur und bei Luftzutritt glatt nach der Gleichung $HgS + O_2 = Hg + SO_2$ um; man erhält also dank dem Umstand, daß Quecksilberoxyd

schon bei 400 bis 600° nicht beständig ist, sondern in Metall und Sauerstoff zerfällt, direkt metallisches Quecksilber. Zusatz von Eisenhammerschlag oder Zinksulfid vermindert die sonst ziemlich bedeutenden Verluste. Das aus dem Ofen destillierende Rohmetall wird zur Reinigung von mechanischen Beimengungen durch Gemsleder gepreßt; von gelösten metallischen Verunreinigungen befreit man es durch wiederholte Destillation. Im Laboratorium, wo die Reinigung des Quecksilbers infolge seiner mannigfachen Verwendung eine ständig wiederkehrende Aufgabe darstellt, schüttelt man das unreine Metall kräftig mit verdünnter Salpetersäure, Eisenchlorid oder mit Schwefelsäure angesäuerter Bichromatlösung, oder läßt es besser in Form eines feinen Regens durch eine lange Schicht saurer Mercuronitrat- oder Eisenchloridlösung hindurchfließen. Hierbei werden alle unedleren Metalle durch Oxydation entfernt. Dasselbe erreicht man durch andauerndes Hindurchleiten eines Luftstromes durch das verunreinigte Metall. Letztere Methode empfiehlt sich namentlich zur Vorreinigung stark verunreinigten Quecksilbers. Zur Befreiung von edleren Metallen ist dagegen Destillation im Vakuum notwendig. Reines Quecksilber benetzt Glas nicht, enthält es aber andere Metalle, so überzieht es sich an der Luft mit einer feinen Oxydhaut, welche bewirkt, daß es am Glase haftet und nicht mehr in runden Tropfen darüber fließt, sondern einen Schweif hinterläßt; es ist dies eine sehr empfindliche Probe auf seine Reinheit.

4. Verwendung. Von Quecksilber und seinen Verbindungen macht man sehr vielfach Gebrauch. Sein flüssiger Zustand, die Gleichmäßigkeit seiner Ausdehnung beim Erwärmen, sein hohes spezifisches Gewicht, sein bei gewöhnlicher Temperatur geringer Dampfdruck, seine große chemische Widerstandsfähigkeit und andere wertvolle Eigenschaften haben ihm in der Apparate- und Meßtechnik ein ausgedehntes Anwendungsgebiet geschaffen. Man benutzt es zur Füllung von Thermometern, Barometern, Manometern, für Quecksilberluftpumpen, als Sperrflüssigkeit für Gase, die von anderen Flüssigkeiten absorbiert werden, zur Erzeugung von monochromatischem und ultraviolettem Licht. Da es als flüssiges Metall nicht den Verschiedenheiten unterworfen ist, welche die festen Metalle je nach ihrer Vorbehandlung aufweisen, dient es als Normalmetall bei elektrochemischen Apparaten. Eine in ein Glasrohr von konstantem Kaliber eingeschlossene Quecksilbersäule, die eine Länge von 100,3 cm und einen Querschnitt von 1 qmm, also ein Quecksilbergewicht von 14,4521 g und die Temperatur 0° hat, stellt die Einheit des elektrischen Leitungswiderstandes, das Ohm, dar. Das scharf definierte und leicht reproduzierbare Potential, das Quecksilberelektroden zeigen, macht es ganz besonders zur Herstellung von Normalelektroden und Normalelementen geeignet (vgl. Abschn. 6). In der Technik macht man von Quecksilber ausgedehnten Gebrauch, z. B. bei der Extraktion von Gold und Silber aus ihren Erzen, bei der Alkalichloridelektrolyse nach dem Verfahren von Castner und Kellner, bei der Feuervergoldung, zum Schutz (Amalgamierung) der Zinkplatten galvanischer Elemente vor dem Angriff durch Säuren im Ruhezustande. Die Spiegel, die früher fast ausschließlich mit Zinnamalgam überzogen waren, sind jetzt vollständig durch Silberspiegel verdrängt. Außerordentlich mannigfaltig ist auch die Verwendung von Quecksilber und seinen Verbindungen im chemischen Laboratorium zu den verschiedensten analytischen und präparativen Zwecken. Quecksilber ist offizinell; mit Fett verrieben sowie auch in kolloidalem Zustande wird es als entzündungswidriges und antisyphilitisches Mittel verwendet, noch ausgedehnter ist die medizinische Verwendung seiner Verbindungen

5. Physikalische Eigenschaften und Konstanten. Das Quecksilber stellt bei gewöhnlicher Temperatur eine leicht bewegliche Flüssigkeit dar. Seine Dichte beträgt bei 0° 13,5956, bei 20° 13,5463, bei 100° 13,3524. Der kubische Ausdehnungskoeffizient berechnet sich zu $0{,}0_3181792 + 0{,}0_9175\,t + 0{,}0_{10}35116\,t^2$. Die Ausdehnung des Quecksilbers durch die Wärme ist der der Gase bis etwa 100° so nahe proportional, daß bis zu dieser Temperatur das Quecksilberthermometer mit dem Gasthermometer gut übereinstimmt. Bei niederer Temperatur (etwa —40°) erstarrt das Quecksilber unter beträchtlicher Volumenverminderung zu einem festen, in regulären Oktaedern oder Nadeln kristallisierenden, silberähnlichen Metall. Sein Schmelzpunkt liegt bei —38,85°, der Siedepunkt bei 375,3° (bei 760 mm Druck). Der Dampfdruck des Quecksilbers ist bei Temperaturen unter 100° ziemlich klein:

bei 0°	0,00002 mm	bei 60°	0,026 mm
bei 20°	0,0013 mm	bei 80°	0,093 mm
bei 40°	0,0063 mm	bei 100°	0,285 mm,

bei höheren Temperaturen ergab sich:

bei 200° 17,015 mm
bei 300° 246,704 mm
bei 340° 546,715 mm.

Die spezifische Wärme wird dargestellt durch die Gleichung

$$c = 0{,}033583 - 0{,}0_6333\,T - 0{,}0_6125\,T^2 - 0{,}0_84165\,T^3 \text{ g-cal.}$$

Die latente Schmelzwärme beträgt 2,83 g-cal., die Verdampfungswärme 62,0 g-cal. Die elektrische Leitfähigkeit (reziproker Wert des in Ohm ausgedrückten Widerstandes von einem Zentimeterwürfel) beträgt bei 0° $1{,}063 . 10^4$, bei 20° $1{,}0444 . 10^4$. Die Abhängigkeit des spezifischen Leitungswiderstandes von der Temperatur wird wiedergegeben durch die Gleichung $W_t = W_0 (1 + 0{,}0_3 929\ t + 0{,}0_6 6\ t^2)$. Festes Quecksilber zeigt gegenüber dem flüssigen eine bedeutende Erhöhung der Leitfähigkeit.

Die Oberflächenspannung des Quecksilbers wird durch elektrische Polarisation in gesetzmäßiger Weise beeinflußt, im Lippmannschen Kapillarelektrometer macht man praktischen Gebrauch davon. Im Dampfzustande besteht Quecksilber aus einatomigen Molekeln, höchstwahrscheinlich bleibt diese Einatomigkeit teilweise auch im flüssigen Zustande erhalten.

Das elektrochemische Aequivalent des Quecksilbers beträgt 2,072 mg pro Coulomb, also 7,458 g pro Ampère-Stunde.

6. Elektrochemie. Das Quecksilber tritt im Gegensatz zu den übrigen Metallen der Berylliumgruppe in zwei Verbindungsstufen auf, es bildet Mercuriverbindungen HgX_2 und Mercuroverbindungen Hg_2X_2. Dementsprechend existieren zwei Arten von Quecksilberionen, die zweiwertigen, einatomigen Mercuriionen $Hg^{\cdot\cdot}$ und die Mercuroionen, welche vorwiegend in Form des zweiwertigen, zweiatomigen Komplexes $(Hg_2)^{\cdot\cdot}$ auftreten; erst bei sehr starken Verdünnungen scheint eine Spaltung dieses Komplexes in einwertige, einatomige Ionen $Hg^{\cdot}$ einzutreten. Das Mercuroion ist aufzufassen als komplexes Mercuriion, an welches ein Quecksilberatom als Neutralteil angelagert ist. Durch diese Addition eines Quecksilberatoms wird die Elektroaffinität des Mercuriions stark erhöht. Dementsprechend zeigen die Mercurosalze stärkere elektrolytische Dissoziation und weit geringere Neigung zur Komplexbildung als die Mercurisalze, auch besitzt das Mercuroion nicht die für das Mercuriion charakteristische Fähigkeit in organische, nicht salzartige Verbindungen einzutreten (s. u.).

Der Grad der elektrolytischen Dissoziation der Mercurisalze in wässeriger Lösung ist wie bei kaum einem anderen Metalle in hohem Maße abhängig von der Natur des Anions. Die Salze der starken Sauerstoffsäuren (HNO_3, $HClO_4$ usw.) sind stark dissoziiert, die der Halogenwasserstoffsäuren und der Rhodanwasserstoffsäure nur sehr wenig; die Mercurisalze der sehr schwachen Säuren (HCN, $HNHCOCH_3$ usw.) mit Quecksilber-Kohlenstoff- oder Quecksilber-Stickstoffbindung noch viel weniger. Zum Vergleich mögen folgende Leitfähigkeitsmessungen dienen:

Aequivalent-Leitfähigkeit von Mercuro- und Mercuriperchlorat bei 25°:

v (Liter)	$Hg_2(ClO_4)_2$	$Hg(ClO_4)_2$
32	122,1	126,9
64	129,2	145,1
128	139,1	171,0
256	146,8	204,1
512	159,1	247,7
1024	175,9	296,9

Molekulare Leitfähigkeit von Mercurichlorid bei 25°:

v	Λ
32	2,17
64	3,77
128	4,91
256	7,54
512	12,0

Für die molekulare Leitfähigkeit des Mercuricyanids wurde gefunden $\Lambda_{32} = 0{,}18$.

Die Mercurosalze sind in wässeriger Lösung merklich hydrolytisch gespalten; bei den Mercuriverbindungen ist, ihrer eigenartigen elektrolytischen Dissoziation entsprechend, auch die hydrolytische Dissoziation sehr verschieden. Die Mercurisalze der starken Sauerstoffsäuren erfahren, wie schon aus der stark sauren Reaktion ihrer wässerigen Lösungen hervorgeht und wie es auch in der großen Differenz $\Lambda_{1024} - \Lambda_{32} = 170$ der Leitfähigkeit des Perchlorats zum Ausdruck kommt (vgl. obige Tabelle) eine viel weitergehende Hydrolyse als die entsprechenden Mercuroverbindungen — die den Mercurisalzen zugrunde liegende Base $Hg(OH)_2$ ist schwächer als die Base $Hg_2(OH)_2$ der Mercuroverbindungen—; der schwachen elektrolytischen Dissoziation der Halogensalze entspricht ihre geringe hydrolytische Dissoziation; die Salze der schwachen Säuren HCN usw. werden selbst bei höherer Temperatur nicht merklich hydrolytisch gespalten.

Mit der geringen Elektroaffinität des Mercuriions steht im Zusammenhange seine ausgesprochene Fähigkeit, sich mit allerlei neutralen Körpern zu komplexen Kationen zu vereinigen; auch bei diesen Komplexsalzen übt die Natur des Anions einen wesentlichen Einfluß auf den Grad der Komplexität aus. Ebenso sind zahlreiche Verbindungen bekannt, bei denen das Quecksilber Bestandteil eines komplexen Anions ($HgCl_4''$, HgJ_4'', $Hg(CN)_4''$ usw.) ist (s. u.).

Da Mercuro- und Mercuriion eine verschiedene Haftintensität (Elektroaffinität) besitzen, muß das Quecksilber verschiedene Stellungen in der Spannungsreihe einnehmen. Mit Hilfe des Gleichgewichts, das zwischen Mercuro- und Mercuriion und metallischem Quecksilber besteht, lassen sich die beiden Ionenarten zukommenden Werte berechnen. Das dem Vorgang $Hg \rightarrow Hg^{\cdot\cdot}$ entsprechende

Normalpotential (bezogen auf die Einheitskonzentration — 1 Gramm-Formelgewicht im Liter — die Normal-Wasserstoffelektrode als Nullpunkt, das Vorzeichen der Ladung der Elektrode entsprechend) beträgt 0,86 Volt, das dem Vorgang $2Hg \rightarrow Hg_2^{\cdot\cdot}$ entsprechende 0,80 Volt; für die Ionenumladung $Hg_2^{\cdot\cdot} \rightarrow 2Hg^{\cdot\cdot}$ ergibt sich 0,92 Volt. Die Zersetzungsspannung einer normalen $Hg^{\cdot\cdot}$-Lösung liegt also um etwa +0,06 Volt höher als die einer normalen $Hg_2^{\cdot\cdot}$-Lösung, das Mercuriion ist demnach edler als das Mercuroion, was ja tatsächlich durch das ganze chemische Verhalten der beiden Verbindungsstufen bestätigt wird. Da nach den Prinzipien der Energetik die maximale Arbeit, welche zu leisten ist, um einen Stoff von der niedrigsten Oxydationsstufe direkt bis zur höchsten zu oxydieren, gleich derjenigen ist, welche aufgewendet werden muß, um den Stoff zunächst von der niedrigsten zur mittleren und von dieser dann weiter zur höchsten zu oxydieren, so muß, da die maximale Arbeit durch die zugehörige elektrische Energie $n . 96540\,\varepsilon$ gemessen wird, die EMK, welche zur direkten Ueberführung der niedrigsten in die höchste Oxydationsstufe erforderlich ist, in jedem Falle zwischen den EMKK liegen, welche zur Oxydation der niedrigsten zur mittleren und von dieser zur höchsten Stufe erforderlich sind, wie obige Zahlen es auch dartun. Für das erwähnte Gleichgewicht zwischen den beiden Ionenarten und metallischem Quecksilber $Hg^{\cdot\cdot} + Hg \rightleftarrows Hg_2^{\cdot\cdot}$ gilt die Beziehung $\frac{c_1}{c_2}$=konst, wo c_1 die Konzentration der Mercuroionen, c_2 die der Mercuriionen bedeutet; es wurde gefunden $\frac{c_1}{c_2}=235$. Im Gleichgewicht mit metallischem Quecksilber ist also die Mercuroionenkonzentration stets 235 mal so groß als die Mercuriionenkonzentration.

Die Messung der elektromotorischen Kraft von Ketten mit schwerlöslichen Quecksilbersalzen ermöglicht es, die bei der Bildung der Mercuroverbindungen stattfindenden Energieumwandlungen zu bestimmen. Aus der Helmholtzschen Gleichung $F\varepsilon = q + FT\frac{d\varepsilon}{dT}$, wo ε die elektromotorische Kraft, F die mit einem Grammäquivalent verbundene Elektrizitätsmenge, q die Aenderung der der inneren (chemischen) Energie, T die absolute Temperatur, $\frac{d\varepsilon}{dT}$ die Aenderung der EMK pro 1° bedeutet, ergibt sich, wenn man die in g-cal ausgedrückten Zahlenwerte der verschiedenen Größen einsetzt, z. B. für die Kette:

$$Hg\,|\,Hg_2Cl_2 + 0{,}01\ n\overrightarrow{KCl}\,|\,nKNO_3\,|\,0{,}01\ K_2SO_4 + Hg_2SO_4\,|\,Hg$$

(der Pfeil gibt die Richtung des Stromes innerhalb der Kette an) bei 18,7°

$$2 . 23117 . 0{,}3015 = q + 291{,}7 . 2 . 23117 . (-0{,}000627)$$

$$q = 23390 \text{ g-cal.}$$

Die insgesamt bei der in der Kette sich abspielenden Reaktion $Hg_2SO_4\,_{(fest)} + 2KCl = Hg_2Cl_2\,_{(fest)} + K_2SO_4$ erfolgenden Energieumwandlungen bestehen darin, daß aus 23390 g-cal chemischer Energie (Wärmetönung der Reaktion) $2F\varepsilon = 13940$ g-cal elektrische Energie und $2FT\frac{d\varepsilon}{dT}$ thermische Energie (Wärmeabgabe an die Umgebung) gebildet werden.

Für die Kette

$$Hg\,|\,Hg_2Cl_2 + 0{,}01\ KCl\,|\,nKNO_3\,|\,0{,}01\ KOH + Hg_2O\,|\,Hg$$

erhält man bei 18,5° entsprechend

$$2 . 23117 . 0{,}1483 = q + 291{,}5 . 2 . 23117 . 0{,}000837$$

$$q = -3710 \text{ g-cal}$$

Die Reaktion

$$Hg_2Cl_{2(fest)} + 2KOH = Hg_2O_{(fest)} + 2KCl + H_2O$$

verläuft also endotherm (q = — 3280 g-cal); die insgesamt sich dabei in der Kette abspielenden Energieumwandlungen bestehen darin, daß 11276 g-cal thermische (aus der Umgebung aufgenommene) Energie in 7566 g-cal elektrische und 3710 g-cal chemische Energie verwandelt werden. Wir haben hier einen schlagenden Beweis für die Tatsache, daß nicht die Wärmetönung des stromliefernden chemischen Prozesses, sondern nur die Aenderung der freien Energie als Maß für die Affinitätskräfte gelten kann.

Die Leichtigkeit seiner Reindarstellung und die natürliche Bildung einer reinen, oxydfreien Oberfläche machen das Quecksilber vor allen anderen Metallen zur Herstellung von Normalelektroden und Normalelementen geeignet. In der folgenden Tabelle sind die am häufigsten verwendeten Normalelektroden zusammengestellt; als Nullpunkt der Elektrodenpotentiale ist das Potential einer Normal-Wasserstoffelektrode von gleicher Temperatur angenommen, die Konzentrationsangaben bedeuten Grammformelgewichte im Liter:

Normalelektrode	ε_h in Volt bei		
	0°	18°	25°
Hg/Hg_2Cl_2, KCl 0,1	+ 0,337	+ 0,337	+ 0,337
Hg/Hg_2Cl_2, KCl 1,0	+ 0,289	+ 0,286	+ 0,285
Hg/Hg_2SO_4, H_2SO_4 0,1 bis 0,5		+ 0,68	
Hg/HgO, KOH 1,0	+ 0,130		+ 0,107
Hg/HgO, NaOH 1,0	+ 0,133		+ 0,111
Hg/HgO, NaOH 0,1	+ 0,184		+ 0.166

Siehe hierzu die Abschnitte „Elektrochemie" dieses Artikels unter „Cadmium" und „Zink", sowie die Artikel „Potential" und „Galvanische Ketten".

7. Nachweis und quantitative Bestimmung. Alle Quecksilberverbindungen verflüchtigen sich beim Erhitzen, die Halogenide ohne Zersetzung, die Sauerstoffverbindungen unter Abscheidung von Quecksilber. Mit trockener Soda im Glührohr erhitzt, geben alle einen grauen, aus feinen Tröpfchen bestehenden Metallspiegel.

Die Quecksilbersalze sind meistens farblos, das Jodid ist rot oder gelb, das Sulfid schwarz oder rot gefärbt.

Von den Mercuroverbindungen sind in Wasser leicht löslich das Fluorid und die Salze einiger Sauerstoffsäuren, Nitrat, Chlorat und Perchlorat, die übrigen sind fast alle schwer löslich. Die Mercuriverbindungen sind im allgemeinen zwar erheblich leichter löslich als die entsprechenden Mercurosalze, die meisten aber doch noch schwer löslich. Auffallend ist die große Löslichkeit der Quecksilberverbindungen, besonders der des Typus HgX_2 in organischen Flüssigkeiten wie Alkohol, Aether, Benzol u. a.; manche schwach dissoziierte Quecksilbersalze kann man durch organische Lösungsmittel teilweise ihren wässerigen Lösungen unter Herstellung eines konstanten Teilungsverhältnisses entziehen.

Charakteristisch für die Quecksilbersalze ist die Leichtigkeit, mit welcher sie hydrolytisch gespalten werden unter Bildung mehr oder minder schwerlöslicher basischer Salze; das gilt besonders für die Salze der Sauerstoffsäuren und zwar für die Mercuriverbindungen in noch weit höherem Maße als für die Mercurosalze.

Aus den Lösungen seiner Salze wird Quecksilber durch unedlere Metalle ausgeschieden; zum Nachweis des Quecksilbers wählt man zweckmäßig Kupfer, auf dessen Oberfläche das Quecksilber infolge des Farbenkontrastes auch in kleinen Mengen sehr leicht erkennbar ist.

Die chemischen Eigenschaften der beiden Ionenarten sind durchaus verschieden, die Mercurosalze gehen jedoch ziemlich leicht unter Abscheidung von Quecksilber in Mercurisalze über.

Ueberschüssiger Schwefelwasserstoff fällt aus den sauren Lösungen aller Quecksilberverbindungen schwarzes HgS, aus den Mercurosalzen neben metallischem Quecksilber. Das Sulfid ist unlöslich in heißen verdünnten Säuren, starke Salpetersäure löst es langsam, Königswasser leicht. Von Schwefelammon und von Alkalilauge wird es nicht angegriffen, durch Schwefelalkali dagegen leicht zu HgS_2K_2 gelöst; durch Wasser wird diese Verbindung jedoch wieder vollständig unter Abscheidung von HgS zerlegt.

Kalilauge fällt aus Mercurisalzlösungen gelbes HgO, aus Mercurosalzen schwarzes Hg_2O. Ammoniak erzeugt aus Mercurichloridlösungen eine weiße Fällung von $HgNH_2Cl$ (unschmelzbares Präcipitat), aus Mercurinitratlösung fallen weiße Oxyamidoverbindungen $Hg_2ONH_2NO_3$. Die entsprechenden Mercurosalze geben mit Ammoniak dieselben Mercuriaminverbindungen, nur sind die Fällungen durch mit ausgeschiedenes metallisches Quecksilber schwarz gefärbt.

Charakteristisch für die Mercurisalze ist besonders auch ihr Verhalten gegen Zinnchlorür; sie werden zunächst zu weißem unlöslichem Mercurochlorid (Calomel) und dieses dann zu Metall reduziert, aus Mercurosalzen wird sofort quantitativ metallisches Quecksilber ausgeschieden.

Kaliumjodid erzeugt in Mercurisalzlösungen einen roten Niederschlag von HgJ_2, das sich im Ueberschuß des Fällungsmittels zu einem farblosen Komplexsalz auflöst, aus Mercurosalzen fällt grünes Hg_2J_2, das ebenfalls von überschüssigem Jodkalium aufgelöst wird, jedoch unter Abscheidung von Quecksilber.

Im Gang der Analyse wird Quecksilber aus saurer Lösung neben Pb, Bi, Cu, Cd, As, Sb, Sn als Sulfid gefällt (Mercurosalze eventuell auch schon vorher durch Chloride neben Pb und Ag als unlösliches Hg_2Cl_2), die Unlöslichkeit des Sulfids in Schwefelammon ermöglicht seine Trennung von Sn, As und Sb, die Unlöslichkeit in heißen verdünnten Säuren die Scheidung von den übrigen Metallen.

Die quantitative Bestimmung des Quecksilbers erfolgt am besten als Sulfid (Fällung mittels H_2S oder bei Gegenwart von Salpetersäure mit Schwefelammon) die Lösung darf dabei das Quecksilber nur als Mercurisalz enthalten. In organischen Verbindungen führt man das Quecksilber zweckmäßig nach der Methode von Carius (Erhitzen der Substanz mit konzentrierter Salpetersäure im geschlossenen Rohr) in eine durch Schwefelwasserstoff fällbare Form über. Liegt ein Mercurosalz vor, so kann das Quecksilber mittels Chlornatrium als Hg_2Cl_2 ausgeschieden und gewogen werden, etwa vorhandenes Mercurisalz wird vorher durch phosphorige Säure zu Mercurosalz reduziert. Auch metallisches Quecksilber kann als Wägungsform dienen, da alle Quecksilberverbindungen durch Erhitzen mit Kalk glatt unter Abscheidung des Metalles zerlegt werden, nur das Jodid bereitet hierbei Schwierigkeiten.

Schließlich läßt sich Quecksilber auch durch Elektrolyse leicht quantitativ bestimmen; am besten verwendet man schwach salpetersaure Lösungen, doch liefern auch neutrale und alkalische Lösungen gute Resultate.

Spektrum. Die Quecksilbersalze geben

kein Flammenspektrum, dagegen liefert Quecksilberchloridlösung — in schwächerem Maße auch Nitrat und metallisches Quecksilber — ein charakteristisches Funkenspektrum mit einer Reihe von Linien, unter denen eine intensiv grüne (546,1) und eine indigoblaue (435,8) charakteristisch sind. Ein Absorptionsspektrum im sichtbaren Gebiet geben die Lösungen von Quecksilbersalzen, da sie alle farblos sind, nicht.

8. Spezielle Chemie. 8a) Verhalten gegen Säuren, Salze, Gase usw. Quecksilber vermag, wie man aus seiner Stellung in der Spannungsreihe schließen kann, aus verdünnten nicht oxydierenden Säuren den Wasserstoff nicht zu verdrängen, wenn nicht infolge weitgehender Komplexbildung der Gegendruck der Quecksilberionen auf einen sehr niederen Wert sinkt. Es wird also von Salzsäure und verdünnter Schwefelsäure nicht, von Bromwasserstoffsäure nur sehr wenig angegriffen, von Jodwasserstoffsäure dagegen infolge von Komplexbildung unter H-Entwickelung leicht gelöst. Heiße konzentrierte Schwefelsäure löst unter SO_2-Entwickelung, je nachdem Hg oder H_2SO_4 im Ueberschuß vorhanden ist, zu Mercuro- oder Mercurisulfat. Das bequemste Lösungsmittel ist Salpetersäure, mit kalter verdünnter Säure entsteht Mercuro-, mit heißer konzentrierter Säure Mercurinitrat. Königswasser löst zu $HgCl_2$.

Reines Quecksilber wird von trockener Luft bei gewöhnlicher Temperatur nicht angegriffen, bei Gegenwart von Feuchtigkeit jedoch oberflächlich oxydiert. Durch andauerndes Erhitzen bis in die Nähe des Siedepunktes wird es in HgO verwandelt. Beim Schütteln mit Luft und Wasser entsteht Ozon. Wasserdampf wird von Hg nicht zersetzt. Chlor, Brom, Jod und Schwefel verbinden sich mit Quecksilber schon bei gewöhnlicher Temperatur. Gasförmiger Chlor-Brom- und besonders Jodwasserstoff werden leicht zersetzt; ebenso reagiert Quecksilber mit Schwefelwasserstoff. Silber wird aus der Lösung seines Nitrates durch Quecksilber teilweise verdrängt.

8b) Amalgame. Fast alle Metalle lösen sich in Quecksilber unter Bildung von Legierungen (Amalgamen), die je nach der Natur und Menge des gelösten Metalls flüssig oder fest sind. In verdünnter Quecksilberlösung bilden die meisten Metalle vorwiegend einatomige Molekeln. Die festen Amalgame stellen häufig nach bestimmten stöchiometrischen Verhältnissen zusammengesetzte, zum Teil schön kristallisierende Stoffe dar, die als chemische Verbindungen von Metall und Quecksilber aufzufassen sind. Für eine Reihe von Metallen sind auch mehrere nach verschiedenen Verhältnissen zusammengesetzte Amalgame bekannt, die analog den verschiedenen Hydraten von Salzen innerhalb gewisser Temperaturgrenzen beständig sind, bei Ueberschreitung derselben aber Umwandlung erleiden. So erhält man z. B. das Amalgam $NaHg_6$ in langen, silberglänzenden Nadeln, die bei 39° in einen Kristallbrei zerfallen, bei 58° vollständig schmelzen und sich bei 40 bis 42° in die Verbindung $NaHg_5$ umwandeln. Nach dem Schmelzpunktdiagramm erscheint auch die Existenz der Verbindungen $NaHg_4$, $NaHg_2$, $Na_{12}Hg_{13}$, NaHg, Na_3Hg_2, Na_5Hg_2 und Na_3Hg wahrscheinlich. Andererseits hat sich bei einer Reihe von Schwermetallamalgamen die Existenz irgendwelcher bestimmter Verbindungen bisher nicht nachweisen lassen. Für die Darstellung der Amalgame kommen hauptsächlich zwei Methoden in Betracht, entweder Auflösung der Metalle in Quecksilber, wenn nötig unter Erwärmen, oder Elektrolyse der betreffenden Metallsalzlösungen unter Anwendung einer Quecksilberkathode.

Die Amalgame haben erheblich andere Eigenschaften als die freien Metalle; Natriumamalgam ist z. B. weit weniger aktiv als freies Natrium, es wird von Wasser nur sehr langsam zersetzt, wahrscheinlich weil die Lösungstension der Verbindungen $NaHg_6$ und $NaHg_5$ weit geringer ist als die des freien Natriums. Die elektrolytischen Potentiale der Amalgame können je nach ihrer Konzentration sehr verschiedene Werte aufweisen. Die Kenntnis der Abhängigkeit des elektromotorischen Verhaltens von der Zusammensetzung der Amalgame bei verschiedenen Temperaturen ist z. B. für die Theorie des Cadmium-Normalelementes von größter Bedeutung.

8c) Mercuroverbindungen. Die Mercurosalze werden erhalten durch Auflösung von Hg_2O oder Hg_2CO_3 in der betreffenden Säure, durch Behandeln von Mercurisalzen mit metallischem Quecksilber oder einem anderen Reduktionsmittel wie SO_2 oder $SnCl_2$, oder, falls das darzustellende Salz schwerlöslich ist, durch Fällung von Mercuronitrat mit einem Alkalisalz der betreffenden Säure.

Mercurochlorid, Calomel, Hg_2Cl_2, kommt in der Natur als Quecksilberhornerz in tetragonalen Kristallen vor. Es wird dargestellt durch Fällen von Mercuronitrat mit Kochsalz oder durch Sublimation von Mercurichlorid mit Quecksilber oder eines Gemenges von Quecksilbersulfat, Quecksilber und Kochsalz. Das gefällte Calomel stellt ein weißes Kristallpulver, das sublimierte eine weiße faserige Masse dar. Beim Erhitzen färbt es sich gelb, bei Glühhitze verdampft es ohne zu schmelzen. Im Licht färbt es sich langsam dunkel, wahrscheinlich unter Bildung von Quecksilber und Sublimat.

In Wasser ist es sehr wenig löslich (Löslichkeitsprodukt $Hg^{\cdot\cdot} . Cl'^2 = 3,5 . 10^{-18}$ bei 25°); von konzentrierten Lösungen von HCl, NaCl, NH_4Cl und anderen Chloriden wird es dagegen infolge Komplexsalzbildung merklich gelöst; auch die konzentrierte Lösung von Mercuronitrat löst reichliche Mengen von Calomel. Seiner Dissoziation in $Hg + HgCl_2$ entsprechend wirkt Calomel wie eine schwerlösliche Modifikation von Sublimat von der Löslichkeit $3 . 10^{-6}$ Mol/Liter.

Mercurobromid, Hg_2Br_2, wird erhalten durch Fällung von Mercuronitrat durch ein Bromid oder durch andauernde Einwirkung von Bromwasserstoffsäure auf Quecksilber. Eigenschaften und Verhalten sind denen des Chlorids sehr ähnlich.

Mercurojodid, Hg_2J_2, wird durch Verreiben von Jod mit überschüssigem Quecksilber unter Befeuchten mit Alkohol oder durch Fällen von Mercurosalzlösung mit KJ dargestellt. Es ist gelb oder gelbgrün gefärbt; die Farbenverschiedenheit ist auf eine mehr oder minder weitgehende Zersetzung $Hg_2J_2 \rightleftarrows Hg + HgJ_2$ zurückzuführen. Alkalijodid beschleunigt diesen Zerfall sehr erheblich. Beim Erhitzen färbt sich das Salz rot, bei 190° beginnt es zu sublimieren. Im übrigen verhält es sich dem Chlorid und Bromid ganz analog.

Mercuroacetat, $Hg_2(CH_3CO_2)_2$, bildet weiße Schuppen; es ist löslich in 133 Teilen Wasser von 15°. Beim Erhitzen entwickelt es Ameisensäure und Aceton.

Mercurooxyd, Hg_2O, fällt aus Mercuronitratlösung durch Zusatz von Alkalihydroxyd als schwarzes Pulver. Es ist sehr unbeständig, besonders am Licht oder bei mäßigem Erwärmen zerfällt es in $HgO + Hg$. Reduktionsmittel wie phosphorige Säure verwandeln es leicht in Metall.

Mercurochlorat und -perchlorat kristallisieren aus Lösungen von frisch gefälltem Hg_2O in den betreffenden verdünnten Säuren über Schwefelsäure heraus. Sie sind in Wasser leicht löslich; die Lösungen sind elektrolytisch und hydrolytisch stark dissoziiert; beim Perchlorat scheidet sich jedoch das basische Salz nicht aus.

Mercurobromat und -jodat sind erheblich schwerer löslich als das Chlorat; das Perjodat kann man nur als basisches Salz erhalten.

Mercurosulfat, Hg_2SO_4, erhält man durch Auflösen von Quecksilber in ($^1/_2$—1 Teil) heißer Schwefelsäure, durch Fällen von Mercuronitrat mit Alkalisulfat oder durch Behandeln von Mercurisulfat mit Quecksilber als weißes schweres Kristallpulver oder in kleinen monoklinen Prismen. Am Lichte färbt es sich grau. In Wasser und verdünnter Schwefelsäure ist es schwer löslich (Löslichkeit = $11,71 . 10^{-4}$); durch Wasser wird es hydrolytisch zerspalten unter Bildung eines grüngelben Kristallpulvers von Hg_2O. $Hg_2SO_4 . H_2O$. 0,0042 n Schwefelsäure wirkt bei 25° nicht mehr zersetzend ein.

Mercuronitrat, $Hg_2(NO_3)_2 . 2H_2O$, erhält man durch Auflösen von Quecksilber in wenig verdünnter Salpetersäure oder durch Behandeln von Mercuronitrat mit Quecksilber. Es bildet kurze monokline Prismen, die bei 70° schmelzen. In wenig Wasser löst es sich vollständig, beim Verdünnen der konzentrierten Lösungen scheiden sich basische Salze von wechselnder Zusammensetzung aus. Als einigermaßen sicher nachgewiesen können folgende basische Verbindungen angesehen werden: $5Hg_2O . 3N_2O_5 . 2H_2O$, $2Hg_2O . N_2O_5$ und $3Hg_2O . N_2O_5 . 2H_2O$.

Mercurocarbonat, Hg_2CO_3, wird durch Alkalicarbonat oder -bicarbonat aus Mercuronitratlösung als gelbes Pulver ausgefällt; es gibt aber sehr leicht CO_2 ab, besonders beim Erhitzen mit Wasser. Am Licht schwärzt es sich unter Zersetzung.

8d) Mercuriverbindungen. Die Mercurosalze werden durch Oxydationsmittel in die entsprechenden Mercuriverbindungen übergeführt; so entsteht Mercurinitrat durch Behandeln von Mercuronitrat oder Quecksilber mit starker Salpetersäure, ebenso geht Mercurosulfat durch Erhitzen mit überschüssiger starker Schwefelsäure leicht in das Mercurisalz über. Auch durch Einwirkung von Säuren auf HgO können die Mercurisalze leicht gewonnen werden.

Mercurifluorid, $HgF_2 . 2H_2O$, ist im Gegensatz zu den anderen Halogenquecksilberverbindungen ein sehr unbeständiger Körper; durch Wasser wird es vollständig gespalten, es zeigt damit ein Verhalten, wie es den Quecksilbersalzen der Sauerstoffsäuren eigen ist.

Mercurichlorid, $HgCl_2$, wegen seiner stark giftigen Eigenschaften und seiner Darstellungsweise durch Sublimation von Quecksilbersulfat mit Kochsalz als Aetzsublimat oder auch kurzweg Sublimat bezeichnet, kristallisiert in farblosen rhombischen Prismen. Es schmilzt bei 265° und siedet bei 307°. In Wasser ist es mäßig löslich: 100 Teile Wasser lösen bei 20° 7,39, bei 100° 53,96 Teile $HgCl_2$; Zusatz eines Alkalichlorides erhöht infolge Komplexbildung die Löslichkeit; auch von den meisten organischen Lösungsmitteln wird es zum Teil in sehr reichlicher Menge aufgenommen: 1 Teil $HgCl_2$ löst sich z. B. in 3 Teilen Alkohol und in 4 Teilen Aether. In wässeriger Lösung ist das Salz elektrolytisch wenig dissoziiert; daraus erklärt sich seine große Beständigkeit und Indifferenz gegen manche Reagenzien; auch seine hydrolytische Dissoziation ist gering, die Lösungen reagieren nur schwach sauer. Auf die geringe elektrolytische

Dissoziation ist es auch zurückzuführen, daß Mercurinitratlösungen, die normale Dissoziation aufweisen, imstande sind, schwer lösliche Chloride, wie AgCl, aufzulösen. Sublimatlösungen werden sehr leicht zu Calomel reduziert, langsam auch schon durch Belichtung.

Sublimat ist für alle Organismen ein außerordentlich starkes Gift; es findet in der Medizin ausgedehnte Verwendung. Kochsalz vermindert seine Wirksamkeit, verhindert aber andererseits die Bildung unlöslicher basischer Salze und beschleunigt die Auflösung. Da Sublimat mit Eiweißstoffen unlösliche Verbindungen bildet, wirkt Eiweiß bei Sublimatvergiftungen als Gegengift; auf denselben Umstand ist die konservierende Wirkung auf anatomische Präparate zurückzuführen.

Sublimat bildet mit HgO eine Reihe von Oxychloriden; man erhält sie durch Einwirkung einer wässerigen oder alkoholischen Lösung von $HgCl_2$ auf HgO, durch Zusammenschmelzen dieser beiden Stoffe oder durch unvollständige Zersetzung von Sublimatlösungen mit Alkalihydroxyd oder -carbonat. Die Oxydverbindungen existieren meistens in mehreren, auch in der Farbe unterschiedenen Modifikationen, z. B. $HgCl_2.2HgO$ in einer schwarzen und einer roten, $HgCl_2.3HgO$ in einer ziegelroten amorphen und einer gelben amorphen oder kristallinischen, $HgCl_2.4HgO$ in einer braunen amorphen oder kristallinischen und einer schwarzen, kristallinischen Modifikation.

Mercuribromid, $HgBr_2$, kristallisiert aus wässeriger Lösung in silberglänzenden Blättchen, aus alkoholischer in weißen rhombischen Prismen. In Wasser ist es wenig löslich. In seinem chemischen Verhalten schließt es sich dem Sublimat vollkommen an. Auch eine Reihe Oxybromide $HgBr_2.HgO$, $HgBr_2.2HgO$ u. a. lassen sich leicht gewinnen.

Mercurijodid, HgJ_2, erhält man am einfachsten durch Zusammenreiben von Quecksilber und Jod oder durch Zusatz von Jodkalium zu einer Mercurisalzlösung. Es ist ein roter, in Wasser sehr schwer, in Alkohol und anderen organischen Flüssigkeiten sowie in heißer Salz- und Salpetersäure, in Mercurinitrat- und Jodkaliumlösung leichter löslicher, tetragonal kristallisierender Körper. Oberhalb 126° geht er unter starker Volumzunahme in eine zweite, gelbe, rhombisch kristallisierende Modifikation über. Vorübergehend kann man die gelbe Modifikation auch bei niedrigerer Temperatur erhalten; so entsteht bei der Fällung von Sublimatlösungen mit Jodkalium zuerst immer ein gelber Niederschlag, der sich aber in wenigen Augenblicken rot färbt; etwas beständiger ist die gelbe Form, wenn man sie durch Wasser aus einer alkoholischen Lösung ausscheidet. Auch bei der Verdichtung der Quecksilberjodiddämpfe erscheinen zuerst immer die feinen Kriställchen der gelben Modifikation. Die Umwandlung der gelben in die rote Form wird durch Licht sowie durch die Gegenwart von Säuren beschleunigt; sie ist mit einer meßbaren Wärmetönung verbunden. Mercurijodid ist eine sehr beständige Verbindung, es wird von den meisten chemischen Reagenzien nicht angegriffen. Durch Erhitzen mit Kalilauge kann man, wenn auch schwierig, ein Oxyjodid $HgJ_2.3HgO$ erhalten.

Mercuricyanid, $Hg(CN)_2$, gewinnt man aus gefälltem HgO und HCN; es kristallisiert in quadratischen Prismen. Beim Erhitzen zerfällt es in Cyangas — zum Teil auch festes Paracyan — und Quecksilber. Es ist in Wasser, Alkohol und Aether löslich. Seine elektrolytische Dissoziation ist so gering, daß es weder die Reaktionen des Quecksilbers noch die des Cyans zeigt; nur Schwefelwasserstoff fällt aus den Lösungen des Quecksilbers aus. Umgekehrt vermag dagegen Quecksilberoxyd unter Bildung von $Hg(CN)_2$ anderen Cyaniden, auch komplexen, wie Berlinerblau, das Cyan zu entziehen. Mit KCN bildet Mercuricyanid unter ziemlich beträchtlicher Wärmeentwicklung komplexes $K_2Hg(CN)_4$.

Mercurirhodanid, $Hg(SCN)_2$, das aus Quecksilbernitrat und Alkalirhodanid als weißer kristallinischer Niederschlag erhalten wird, zersetzt sich beim Erhitzen unter starkem Aufblähen (Pharaoschlangen).

Mercuriacetat, $Hg(CH_3CO_2)_2$, bildet weiße Kristallblättchen; es löst sich in 2,75 Teilen Wasser von 19° und 1 Teil von 100°. Die wässerige Lösung reagiert sauer und wird beim Erhitzen fast vollständig in Oxyd und Säure gespalten.

Mercurioxyd, HgO, bildet sich als rotes kristallinisches Pulver, wenn man Quecksilber an der Luft über 300° erhitzt. Die Reaktion $Hg + O \rightleftarrows HgO$ ist umkehrbar, je nach der Höhe der Temperatur und des Sauerstoffdruckes kann man den Vorgang im einen oder anderen Sinne verlaufen lassen. Dasselbe Produkt erhält man bei gelindem Erhitzen von Mercuri- oder Mercuronitrat; auf Zusatz von Alkalihydroxyd zu einer Mercurisalzlösung dagegen fällt HgO in der Kälte als gelbes, in der Hitze als rötlich gelbes Pulver aus. Ob die Farbunterschiede nur von einer verschieden feinen Verteilung herrühren, oder ob es sich um 2 Isomere handelt, ist nicht sicher entschieden. Die Löslichkeit von HgO in Wasser beträgt bei 25° 0,0515 g/Liter, durch Zusatz von Baryt wird sie erhöht. Reduktionsmittel bewirken sehr leicht, langsam auch schon Belichtung Reduktion zu Metall.

Quecksilberperoxyd, HgO_2, läßt sich durch Behandlung von HgO mit konzentriertem Wasserstoffperoxyd gewinnen; es ist ein tiefrotbrauner, äußerst zersetzlicher Körper. Seine Reaktionen beweisen, daß er ein Derivat des Wasserstoffsuperoxyds und nicht etwa ein Oxyd eines vierwertigen Quecksilbers darstellt.

Mercurisulfid, HgS, tritt in 2 Modifikationen, einer unbeständigen schwarzen und einer beständigen roten auf. Das schwarze amorphe Sulfid wird aus Mercurisalzlösungen durch H_2S gefällt, es bildet sich auch beim Zusammenreiben der beiden Elemente. Das rote Sulfid kommt in der Natur als Zinnober vor, künstlich erhält man es durch Sublimation eines Gemenges von Quecksilber, Quecksilberoxyd und Schwefel. Durch Behandlung mit Polysulfiden kann man das schwarze Sulfid in das rote umwandeln. Da HgS in Wasser äußerst wenig löslich ist, kann man das Quecksilber selbst aus Lösungen, die nur ganz geringe Mengen $Hg^{\cdot\cdot}$-Ionen enthalten, z. B. aus Mercuricyanid und organischen Quecksilberverbindungen durch H_2S ausscheiden. Nur Königswasser und Lösungen von Kaliumsulfid und Polysulfiden vermögen HgS zu lösen. Diese Unlöslichkeit sowie seine Luftbeständigkeit machen das HgS in der analytischen Chemie vor allen anderen Verbindungen als Abscheidungs- und Wägeform des Quecksilbers geeignet.

Die Mercurisalze der Halogensauerstoffsäuren sind in wässeriger Lösung elektrolytisch und hydrolytisch stark dissoziiert. Chlorat, Bromat und Jodat zersetzen sich leicht unter Abscheidung unlöslicher, weiß, gelb oder orange gefärbter basischer Produkte, während die wässerige Lösung des Perchlorats den basischen Körper nicht ausscheidet.

Mercurisulfat, $HgSO_4$, das man durch Eindampfen von Quecksilber mit konzentrierter Schwefelsäure gewinnt, bildet eine weiße kristallinische Masse oder sternförmig gruppierte Blättchen. Beim Erhitzen färbt es sich gelb, dann rot, bei Rotglut tritt Zersetzung ein. Auch ein in rhombischen Säulen kristallisierendes Hydrat $HgSO_4 . H_2O$ ist bekannt. Viel Wasser verwandelt das Mercurisulfat in schwerlösliche basische Salze, von denen $HgSO_4 . 2HgO$ (Turbith), ein gelbes, in der Hitze rotes Pulver, und $3HgO . 2SO_3 . 2H_2O$, das in farblosen monoklinen Kristallen auftritt, näher charakterisiert werden konnten.

Mercurinitrat, $Hg(NO_3)_2$, bildet sich beim Auflösen von Quecksilber in überschüssiger Salpetersäure; aus der Lösung kann das Hydrat $Hg(NO_3)_2 . {}^1/_2H_2O$ in Form großer, farbloser, leicht zerfließlicher Kristalle gewonnen werden. Durch Wasser wird es sehr leicht zersetzt unter Bildung einer Reihe basischer Salze wie $Hg(NO_3)_2 . 2HgO . H_2O$ und $Hg(NO_3)_2 . HgO . H_2O$.

Mercuricarbonat ist nicht bekannt, die Fällung von Mercurinitratlösungen mit Kaliumcarbonat oder -bicarbonat führt zur Bildung braun gefärbter basischer Produkte.

8e) Komplex- und Doppelsalze. Quecksilber hat eine sehr ausgesprochene Neigung, zusammengesetzte Verbindungen zu bilden, deren wässerige Lösungen nur sehr kleine Mengen Quecksilberionen enthalten und in denen das Quecksilber einen Bestandteil komplexer Ionen bezw. Salze bildet. Komplexe Mercuroverbindungen sind nur wenige bekannt; sie besitzen eine sehr geringe Beständigkeit, durch Wasser werden sie vollständig zerlegt. Die Mercurisalze dagegen, besonders die schwach dissoziierten Halogenverbindungen, sind in hohem Maße zur Bildung von allerlei Doppel- und Komplexverbindungen befähigt, wobei alle möglichen Grade von Komplexität, von den gewöhnlichen Doppelsalzen, die beim Auflösen in Wasser fast vollständig in die Komponenten zerspalten werden, bis zu hochkomplexen Verbindungen, deren $Hg^{\cdot\cdot}$-Konzentration in Lösung äußerst gering ist, auftreten können. Daß solche Komplexe auch in Lösung vorhanden sind, geht schon daraus deutlich hervor, daß beim Vermischen der Lösungen der Komponenten oft recht erhebliche Wärmetönungen auftreten. Am eingehendsten untersucht sind die Komplexverbindungen der Mercurihalogenide; sie können sehr verschiedenen Typen angehören, der wichtigste ist der Typus $HgX_2 . 2MeX$ (X=Cl, Br, J, CN, SCN; Me=1 Aeq. Metall), es ist dies zugleich derjenige, der die Höchstzahl von Halogenionen die sich an 1 Mol. HgX_2 anlagern können, nämlich zwei, enthält. Die Frage, welche Komplexe auch in wässeriger Lösung beständig sind, und bis zu welchem Betrage ein Zerfall in die Bestandteile stattfindet, sowie die gegenseitigen Beziehungen mehrerer in Lösung existenzfähiger Komplexe, sind durch eingehende Untersuchungen klargestellt. Es muß hier genügen, einige wenige der äußerst zahlreichen derartigen Verbindungen kurz zu kennzeichnen.

Die Löslichkeit von $HgCl_2$, $HgBr_2$ und HgJ_2 wird durch die Gegenwart der betreffenden Halogenwasserstoffsäuren erheblich vermehrt; dabei findet eine beträchtliche Wärmeentwickelung statt, ein Umstand, der nur durch die Bildung komplexer Säuren erklärt werden kann. Es ist auch gelungen, einige dieser Säuren wie $H_2(HgCl_4) . 7H_2O$ und $H_4(Hg_3Cl_{10}) . 14H_2O$ in festem Zustande zu isolieren. Es sind ebenso starke Säuren wie die Halogenwasserstoffsäuren. Ihre Salze zeigen in wässeriger Lösung neutrale Re-

aktion, während Sublimatlösungen deutlich sauer reagieren. Von den Salzen sind besonders die Alkali- und Ammoniumsalze näher bekannt, aber auch Salze der Alkalierd- und Schwermetalle wie $Cu_2(HgJ_4)$, $Ag_2(HgJ_4)$ sowie gemischte Doppelsalze wie $2HgCl_2 . K_2CrO_4$, $2HgCl_2 . NH_4NO_3$ oder $HgJ_2 . HgSO_4$ sind bekannt. Wie die Halogenverbindungen zeigen auch das Mercuricyanid und -rhodanid starke Neigung zur Komplexbildung; man kennt reine Doppelcyanide und -rhodanide wie $K_2Hg(CN)_4$, $Ca[Hg_2(CN)_6] . 8H_2O$, $K_2Hg(SCN)_4$, sowie auch gemischt-anionische Komplexe, Chlorocyanide wie $Na[Hg(CN)_2Cl]$, Bromocyanide wie $K[Hg(CN)_2Br] . H_2O$, Rhodanocyanide wie $K[Hg(CN)_2 . SCN]$, Nitratocyanide wie $Zn[Hg(CN)_2NO_3]_2 . 7H_2O$ usw. Schließlich sind auch Komplex- und Doppelsalze des Mercurisulfids wie $K_2HgS_3 . 5H_2O$, $HgS . HgCl_2$, Mercurisulfits $Hg(SO_3Na)_2 . H_2O$, Mercurisulfats $3HgSO_4 . K_2SO_4 . 2H_2O$, Nitrats $Hg(NO_3)_2 . 2AgJ$ usw. in großer Mannigfaltigkeit dargestellt worden.

Charakteristisch für das Quecksilber ist ganz besonders auch seine Fähigkeit zur Bildung beständiger Verbindungen mit Metall-Kohlenstoff- und Metall-Stickstoffbindungen. Während die Metallalkyle von Mg, Zn, Cd höchst zersetzliche Verbindungen darstellen, ist z. B. $Hg(CH_3)_2$ ein ziemlich indifferenter Stoff. Ohne Schwierigkeit läßt sich Quecksilber in zahlreiche aliphatische und aromatische Körper einführen

$$\left(Hg\begin{matrix} / C_6H_4N(CH_3)_2 \\ \backslash C_6H_4N(CH_3)_2 \end{matrix},\ JHg.C(Hg_2O)COOH \text{ usw.}\right)$$

Das Quecksilber verliert in diesen Verbindungen seine Metallnatur und verhält sich ganz ähnlich wie an Kohlenstoff gebundener Wasserstoff.

Mit Ammoniak und verwandten Basen bilden die Mercurisalze wohldefinierte Verbindungen. Die Ansichten über die Natur derselben sind jedoch zurzeit trotz zahlreicher Untersuchungen noch geteilt; namentlich ihre Unlöslichkeit setzt der Erforschung ihrer Konstitution erhebliche Schwierigkeiten entgegen.

Es scheinen drei Gruppen von Quecksilberammoniakverbindungen zu existieren.

1. Mercuriammoniakverbindungen $Hg(NH_3)_nX_2$ (X=Cl, Br, J, CN, nicht Radikal einer Sauerstoffsäure), welche durch Einlagerung von NH_3 in das Molekül des Mercurichlorids entstehen, und aus denen sich das Ammoniak durch verschiedene Reagenzien ziemlich leicht wieder abspalten läßt. Die wichtigste Verbindung dieser Gruppe ist der sogenannte schmelzbare Präcipitat $Hg(NH_3)_2Cl_2$. Die große Beständigkeit der Verbindung läßt für sie auch die Konstitution

$$Hg\begin{matrix} / NH_3Cl \\ \backslash NH_3Cl \end{matrix} \quad \text{(Mercuridiammoniumchlorid)}$$

nicht ausgeschlossen erscheinen.

2. Amidomercuriverbindungen $HgX . NH_2$, also Derivate des Ammoniaks, die dadurch entstehen, daß eines des Wasserstoffatome von NH_3 durch den Rest HgX substituiert wird. Der bekannteste Vertreter dieser Reihe ist der „unschmelzbare Präcipitat", $HgCl . NH_2$, den man erhält durch Versetzen von Mercurichloridlösung mit Ammoniak. Außer der angegebenen kommen für diesen Körper auch noch die Formeln $Hg:NH_2Cl$ (Mercuriammoniumchlorid) und $Hg_2NCl + NH_4Cl$ (Dimercuriammoniumchlorid + Salmiak) in Betracht.

3. Mercuriammoniumverbindungen, die sich von den Ammoniumverbindungen in der Weise ableiten, daß entweder 2 H-Atome durch die einwertige Gruppe (HgOH) oder die 4 H-Atome durch 2 Hg-Atome substituiert sind. Die diesen Verbindungen zugrunde liegende Base, die sogenannte Millonsche Base, hat also entweder die Zusammensetzung $(HOHg)_2 . NH_2OH$ oder $NHg_2OH . 2H_2O$ (Dimercuriammoniumhydroxyd). Diese Base, die durch Einwirkung von Ammoniak auf HgO entsteht, verliert leicht 1 Mol. Wasser. Von dieser anhydrisierten Base $OHg_2:NH_2 . OH$ leiten sich die Salze dieser Reihe ab: $OHg_2:NH_2X$ (X=Halogen, NO_3 usw.). Das bekannteste derselben, das Jodid $OHg_2 . NH_2J$, ist der braune Körper, der aus dem Neßlerschen Reagens durch Ammoniak ausgeschieden wird. Schon äußerst geringe Mengen, wie sie z. B. in den Gebrauchswässern vorkommen, lassen sich durch eine gelbbraune Färbung der Flüssigkeit erkennen. Durch vollständige Entwässerung entsteht aus der Millonschen Base eine sehr explosive Verbindung Hg_2NOH, die keine basischen Eigenschaften mehr besitzt.

Die Mercurihalogenide, mit Ausnahme des Fluorids, liefern Verbindungen der ersten und zweiten Gruppe, die Mercurisalze der Sauerstoffsäuren vorwiegend solche der dritten Gruppe. Dieses verschiedene Verhalten erklärt sich aus der Tatsache, daß die Mercurisalze der Sauerstoffsäuren und des Fluorids in Lösung stark hydrolysiert werden, die Halogenide dagegen nicht.

Wie Ammoniak können auch Amine, Hydrazin und Pyridin in das Molekül der Mercurisalze eintreten. Auch Doppelverbindungen wie $HgCl_2 . 4ZnCl_2 . 10NH_3 . 2H_2O$, $HgJ_2 . CuJ_2 . 4NH_3$ sind in großer Zahl dargestellt worden.

9. Thermochemie. Da das Quecksilber eine große Anzahl nicht oder wenig dissoziierte Verbindungen bildet, weisen seine thermochemischen Verhältnisse eine größere Mannigfaltigkeit auf, als bei anderen Metallen

beobachtet wird. Das Gesetz der Thermoneutralität, nach dem beim Vermischen äquivalenter Mengen stark dissoziierter Salze die Beschaffenheit der Lösungen nicht geändert wird, insbesondere keine Wärmetönung dabei auftritt, hat deshalb für die Quecksilberverbindungen in der Regel keine Gültigkeit. Dementsprechend weisen die Neutralisationswärmen des Quecksilberoxyds mit verschieden Säuren große Verschiedenheiten auf:

$\frac{1}{2}$ $HgO+HCl.aq$:	9460 g-cal.
$\frac{1}{2}$ $HgO+HCN.aq$:	15370 „
$\frac{1}{2}$ $HgO+HNO_3.aq$:	3105 „
$\frac{1}{2}$ $HgO+\frac{1}{2}H_2SO_4.aq$:	1300 „

Direkt vergleichbar sind nur die drei ersten Zahlen, die sich auf die gelösten Salze beziehen, die letzte gilt für festes $HgSO_4$, enthält also noch die Fällungswärme. Die Differenzen der Zahlen stellen die Wärmetönungen dar, die bei gegenseitiger Verdrängung der entsprechenden Ionen auftreten.

In folgender Tabelle sind die Bildungswärmen einiger Quecksilbersalze zusammengestellt; sie beziehen sich auf den Aggregatzustand, in dem die beteiligten Körper sich bei gewöhnlicher Temperatur befinden:

Hg_2O :	22170 g-cal.	HgO	20700 g-cal.
Hg_2Cl_2 :	62600 „	$HgCl_2$	53200 „
Hg_2Br_2 :	49000 „	$HgBr_2$	40500 „
Hg_2J_2 :	28400 „	HgJ_2 (rot)	25100 „
		HgS	10000 „

Auch die Umwandlungswärmen einiger Quecksilbersalze in ihre Isomeren sind bekannt; es wurde z. B. gefunden

Hg_2J_2 grüngelb→gelb+150 g-cal.
HgJ_2 gelb→rot+3000 g-cal.

Die Quecksilberhalogenverbindungen lösen sich in wässeriger Lösung der Alkalihalogenide unter schwacher Wärmeentwickelung. Für die Bildungswärme einiger fester Komplexsalze aus den beiden Salzkomponenten wurde gefunden:

$HgCl_2.KCl$	2400 g-cal.
$HgCl_2.2KCl$	3800 „
$KHgJ_3$	2100 „
K_2HgJ_4	3000 „
$K_2Hg(CN)_4$	17600 „

Von besonderem Interesse sind die thermischen Erscheinungen, die bei der Bildung von Amalgamen auftreten; eingehende Untersuchungen darüber sind zuerst von Berthelot bei den Amalgamen von K und Na unternommen worden.

10. Kolloidchemie. Das Hydrosol des Quecksilbers ist rein nur in sehr verdünntem Zustande einigermaßen haltbar, dagegen kann es als Adsorptionsverbindung mit einem anderen beständigeren Kolloid auch in höherer Konzentration gewonnen werden. Rein erhält man das flüssige Hydrosol durch Zerstäubung einer Quecksilberkathode, wenn sich das Quecksilber in stark aufgelockertem Zustande befindet, am besten, wenn man den Lichtbogen unter Wasser an einer mit Hg überzogenen Eisen-, Zink- oder Bleikathode erzeugt. Es bildet eine im durchfallenden Lichte schön rehbraune, im reflektierten dunkelbraune bis schwarze Flüssigkeit. Unter Verwendung der oszillierenden Entladungen eines Funkeninduktoriums läßt sich bei tiefer Temperatur auch das Isobutylalkosol gewinnen. In weit konzentrierterem Zustande erhält man das Quecksilberhydrosol als Adsorptionsverbindung mit kolloider Zinnsäure durch Reduktion schwach salpetersaurer Mercuronitratlösungen mit möglichst neutralen Stannonitratlösungen. Aus den so gewonnenen, in dünner Schicht klar durchsichtigen braunen Lösungen läßt sich auch das feste Hydrosol in Form eines feinen schwarzen Niederschlags abscheiden. Durch Trocknen desselben im Vakuum erhält man silberglänzende Stücke, die in Wasser wieder mit tiefbrauner Farbe in das flüssige Hydrosol übergehen.

Versetzt man diese Lösungen mit der der Gleichung $Hg+HgCl_2=Hg_2Cl_2$ entsprechenden Menge einer verdünnten Mercurichloridlösung oder mit der zu der Reaktion $2Hg+Cl_2=Hg_2Cl_2$ erforderlichen Menge Chlorwasser, so entsteht als Adsorptionsverbindung mit Zinnsäure das Hydrosol des Mercurochlorids. Ganz analog kann man das Mercurobromidhydrosol gewinnen. Durch Umsetzung von Mercuronitrat mit Halogennatrium bei Gegenwart von Eiweißsubstanzen kann man die Hydrosole aller drei Mercurohaloide als Adsorptionsverbindungen mit den angewandten Eiweißkörpern in flüssiger und fester Form darstellen.

Kolloidale Lösungen von Quecksilberoxyd, bezw. -oxydul entstehen, wenn man die Quecksilbersalze der durch Einwirkung von ätzenden Alkalien auf Eieralbumin sich bildenden Säuren, der Lysalbin- und Protalbinsäure, mit Alkalilauge versetzt; die Natriumsalze der beiden organischen Säuren wirken hierbei als Schutzkolloide. Durch vorsichtiges Eindampfen im Vakuum kann man auch das feste Hydrosol dieser beiden Adsorptionsverbindungen gewinnen.

Kolloidales Quecksilbersulfid erhält man durch wiederholte Behandlung des aus neutralen Mercurisalzlösungen ausgefällten Gels mit H_2S-Wasser. Es bildet in stark verdünntem Zustande eine klar durchsichtige braune, im auffallende Licht grünlich fluoreszierende, in konzentriertem Zustande tiefschwarze Flüssigkeit, die sich längere Zeit ohne Gelbildung zum Sieden erhitzen läßt; alle Elektrolyte scheiden dagegen das Gel aus. Organosole des HgS können durch

Einleiten von H_2S in die Lösungen von Mercuricyanid in den betreffenden organischen Flüssigkeiten gewonnen werden, auch das Hydrosol läßt sich auf diesem Wege darstellen.

Literatur. *H. Ley. Quecksilber. In Abeggs Handbuch der anorganischen Chemie, Bd. II, 2, Leipzig 1905.*

C. Tubandt.

i) Radium.

Ra. Atomgewicht 226,4.

1. Atomgewicht. 2. Vorkommen: a) in Mineralien. b) in Gesteinen. α) in Eruptivgesteinen; β) in Sedimentgesteinen; γ) in kristallinen Schiefern. c) in Mineralquellen. 3. Geschichte. 4. Darstellung und Verwendung. 5. Formarten. 6. Elektrochemie. 7 Spezielle Chemie (Salze). 8. Analytische Chemie: a) Quantitative Bestimmung; b) Qualitative Bestimmung; c) Trennung von Baryum; 9. Thermochemie (Umwandlung). 10. Photochemie: a) Flammenfärbung. b) Spektrum. c) Strahlung. 11. Kolloidchemie (Adsorption).

1. Atomgewicht. In der von der „Internationalen Atomgewichtskommission" alljährlich herausgegebenen Atomgewichts-Tabelle erscheint das Radium erstmalig (1) im Jahre 1903 mit dem Atomgewicht 225.

Alle direkten (gravimetrischen) Atom- oder Aequivalent-Gewichtsbestimmungen des Radiums wurden mit dem wasserfreien Chlorid, $RaCl_2$, ausgeführt, und zwar nach der klassischen Methode von Stas, die auf der Wägung des in einem bekannten Gewichte wasserfreien Radiumchlorids enthaltenen Chlors als Silberchlorid beruht. Die Atomgewichtswerte wurden berechnet unter der Annahme, daß das Radium ein zweiwertiges Metall ist und daß das Atomgewicht des Silbers 107,93 und das des Chlors 35,45 ist.

Die zurzeit neueste Bestimmung von Frau P. Curie (2) ergab als Mittel aus drei Versuchen, die mit je etwa 0,4 g reinstem $RaCl_2$ ausgeführt wurden, Ra = 226,45, welcher Wert auf eine halbe Einheit genau ist. Frühere Versuche (3), die mit nur 0,09 g etwas weniger reinem $RaCl_2$ und nach weniger vollkommenen Methoden ausgeführt worden waren, hatten als Mittel aus drei Bestimmungen, die um etwa eine Einheit kleinere Zahl 225,3 ergeben. T. E. Thorpe (4) führte mit 0,06 bis 0,08 g $RaCl_2$, das in derselben Weise wie das Curiesche Salz dargestellt und analysiert wurde, ebenfalls Atomgewichtsbestimmungen aus, und fand als Mittel dreier hintereinander ausgeführter Bestimmungen in guter Uebereinstimmung mit den Curieschen Werten Ra = 226,7. Thorpe selbst zieht den Wert von Frau Curie vor, weil dieser mit viel größeren Substanzmengen bestimmt wurde, und sieht in der von ihm gefundenen Zahl lediglich eine Bestätigung des Curieschen Wertes (5).

Der „Internationale Atomgewichtsausschuß für 1909" setzte auf der Grundlage Ag = 107,880, und Cl = 35,460 das Atomgewicht des Radiums zu 226,4 fest (6), und hat daran seither nichts mehr geändert.

C. Runge und I. Precht (7) berechneten durch Extrapolation aus den Beziehungen zwischen den homologen Linien in den Funkenspektren des Mg, Ca, Sr und Ba zu den entsprechenden Atomgewichten für das Radium den Wert 257,8 auf Grund der Annahme, daß innerhalb einer Gruppe des periodischen Systems der Elemente der Logarithmus des Atomgewichts eine lineare Funktion des Logarithmus des Abstandes homologer Linienpaare in den Spektren sei. W. M. Watts (8) hält das von Runge angegebene Kriterium für die Homologie von Spektrallinien, nämlich die gleichartige Zerlegung der Spektrallinien im magnetischen Felde nicht in allen Fällen für anwendbar und zeigt, daß man auch unter Zugrundelegung des Runge-Prechtschen Gesetzes zu dem Atomgewicht Ra = 228 (annähernd) gelangt, wenn man das Radium in die Reihe Be Zn Cd Hg einordnet, ähnlich, wie in dieser Beziehung Mg besser mit Ca und Sr als mit Zn und Cd; Li und Na besser mit Cu und Ag, als mit K, Rb und Cs zusammengestellt werden. Andererseits berechnete Watts eine Gleichung für die Beziehung zwischen dem Abstand homologer Linienpaare im Spektrum und den Atomgewichten, die für Mg, Ca, Sr, Ba gut stimmend, keine gerade Linie, sondern eine leicht gekrümmte Kurve darstellt und für Radium zu dem Atomgewicht 226,56 führt. Aus dem Spektrum von Radium einerseits, H, Ba und Ca andererseits ermittelt Watts für das Atomgewicht des Radiums den Wert 224,89

C. Runge (9) hält die von Watts ausgewählten Linienpaare nicht für homologe Linien und deshalb Watts' Ergebnisse für zufällige, indem er zeigt, daß man nach Watts' zweitem Gesetze, je nachdem man das Atomgewicht des Radiums von Mg, Ca, Sr oder Ba aus berechnet, für Radium Werte zwischen 177 und 233 erhält. Runge hält an den von ihm und Precht auf spektroskopischem Wege gefundenen Atomgewichtszahlen des Radiums fest und weist darauf hin (10), daß das spektroskopische Kriterium der absoluten Reinheit des Radiumsalzes, das Frau Curie für ihre gravimetrischen Atomgewichtsbestimmungen benutzte, kein sicherer Beweis für die Reinheit ist.

Es ist in diesem Zusammenhange bemerkenswert, daß das nach der Runge-Prechtschen spektroskopischen Methode

Mineral	Herkunft	Ra in %	Ur in %	Ra/Ur
Chalcolith	Sachsen	0,714 × 10—5	39,29	1,82 · 10—7
,,	Deutschland	0,905 ,,	28,80	3,14 ,,
,,	Portugal 1.	1,30 ,,	39,05	3,33 ,,
,,	,, 2.	1,21 ,,	36,20	3,33 ,,
,,	,, 3.	0,024 ,,	0,724	3,33 ,,
,,	Cornouailles	1,70 ,,	48,66	3,49 ,,
Carnotit	Colorado	0,375 ,,	16,00	2,34 ,,
Gummit (lösl. Teil)	Deutschland	0,31 ,,	12,20	2,54 ,,
,, (roh. Min.)	Deutschland	0,58 ,,	17,37	3,34 ,,
Autunit	Autun	1,20 ,,	46,92	2,56 ,,
,,	Tonkin	1,22 ,,	47,10	2,59 ,,
Pechblende	St. Joachimstal	1,48 ,,	46,11	3,21 ,,
,,	Norwegen	0,17 ,,	4,67	3,64 ,,
,,	,,	2,05 ,,	58,90	3,48 ,,
,,	Cornouailles	1,07 ,,	28,70	3,74 ,,
Samarskit	Indien	0,295 ,,	8,80	3,35 ,,
Broeggerit	Norwegen	2,10 ,,	63,89	3,29 ,,
Cleveit	,,	1,81 ,,	54,90	3,32 ,,
Uranothorit	,,	0,16 ,,	4,83	3,31 ,,
Fergusonit	,,	0,223 ,,	6,30	3,55 ,,
Thorianit	Ceylon	0,66 ,,	18,60	3,55 ,,

ermittelte Atomgewicht des Kaliums, das schwach radioaktive Eigenschaften hat, ebenfalls zu hoch ausfällt (11).

G. Rudorf (12) weist darauf hin, daß die Beziehung zwischen Linienabstand (in Schwingungszahlen) und dem Quadrate des Atomgewichts keine genaue lineare Funktion ist, wie Runge und Precht für ihre Rechnungen annehmen, und deshalb die weite Extrapolation auf das Atomgewicht des Radiums nicht gestattete. Wäre das spektroskopisch zu 258 bestimmte Atomgewicht richtig, so müßte das Radiumchloridpräparat, an dem P. Curie im Jahre 1903 das Atomgewicht zu 225,3 bestimmt hatte, etwa 20% Baryumchlorid als Verunreinigung enthalten haben, was ganz ausgeschlossen erscheint (13).

Der gravimetrisch bestimmte Wert des Atomgewichtes des Radiums steht weiterhin im besten Einklange mit der Stellung des Radiums im periodischen System der Elemente als Endglied der zweiten Gruppe der verwandten Elemente Mg, Ca, Sr, Ba und als derzeitiges Anfangsglied der letzten Periode des Systems, welche mit noch großen Lücken die radioaktiven Elemente Radium, Thorium und Uranium enthält, und mit der später (S. 988) zu besprechenden elektrolytischen Leitfähigkeit wässeriger Radiumsalzlösungen.

Das Atomgewicht 226,4 steht ferner in vorzüglicher Uebereinstimmung mit dem neuerdings von A. Debierne (14) durch Vergleich der Ausströmungsgeschwindigkeiten von Radiumemanation, Sauerstoff und Argon für die Radiumemanation zu 220 bestimmten Atomgewichte, denn Radium verliert beim Uebergange in die Radiumemanation ein Heliumatom vom Atomgewicht = 4:

$$\underset{226,4}{\text{Ra}} = \underset{222,4}{\text{Ra-Em}} + \underset{4}{\text{He.}}$$

W. Ramsay und R. W. Gray (15) ermittelten in guter Uebereinstimmung mit der Debierneschen Zahl durch direkte Wägung eines kleinen Volumens reiner Radiumemanation auf einer eigens dafür konstruierten Mikrowage aus Quarz das Atomgewicht der Radiumemanation als Mittel aus 2 Versuchsserien zu 218 bezw. 222.

Die Zerfallstheorie würde bei Annahme des Atomgewichts 226,4 für Radium, für die Radiumemanation das Atomgewicht 222,4 erfordern.

Es sei noch erwähnt, daß ein Atomgewicht von Ra = 258 mit der feststehenden Tatsache, daß das Radium ein Zerfallsprodukt des Urans (Ur = 238,5) ist, sich nicht vereinigen läßt.

2. Vorkommen. a) In Mineralien. Das Vorkommen des Radiums in Mineralien wird bedingt durch die genetische Beziehung, die zwischen dem Uran und dem Radium derart besteht, daß sich das Uran über die Stoffe Radiouran → Uran X → Jonium in Radium umwandelt; da jede einzelne Phase dieser aneinander gekuppelten Reaktionen, ebenso wie der weitere Zerfall des Radiums selbst, nach einem Zeitgesetze 1. Ordnung mit einer unveränderlichen Geschwindigkeitskonstanten erfolgt, besteht bei primären Uranmineralien (d. h. solchen, die seit ihrer Bildung keinerlei Auslaugung erfahren haben) von einem gewissen Alter an ein Mengengleichgewicht zwischen Uran und Radium, derart, daß 1 g Uran (Element) sich im Gleich-

gewicht mit $3,4 \times 10^{-7}$ g Radium (Element) befindet (16). Neuere Messungen über das Verhältnis zwischen Uran und Radium in radioaktiven Mineralien führte E. Gleditsch (17) aus, deren Resultate in der Tabelle auf Seite 983 wiedergegeben sind.

Man sieht, daß bei den verschiedenartigsten Mineralien insbesondere die Größenordnung des Verhältnisses Ra/Ur konstant ist. Bei den Mineralien, wo, wie bei Gummit, Autunit, Carnotit u. a. das Verhältnis Ra/Ur zu klein ist, sind wohl sekundäre Auslaugungsprozesse die Ursache. Daß dies speziell beim Autunit die Ursache davon ist, daß dieses Mineral stets nur einen Teil der theoretischen Gleichgewichtsmenge an Radium enthält, und nicht etwa wie F. Soddy (18) aus dem Heliumgehalt schließt, das jugendliche Alter von nur 30 Jahren, bewiesen W. Marckwald und Al. S. Russell (19) durch die Bestimmung des Joniumgehaltes, aus dem sich ein Mindestalter von 100000 Jahren für den Autunit berechnen ließ. W. Marckwald und Al. S. Russell (19) bestimmten das relative Mengenverhältnis von Uran und Radium (und bei einigen Erzen auch von Jonium) und geben folgende Zusammenstellung, wobei der relative Radium- und der relative Jonium-Gehalt von Joachimsthaler Pechblende als Einheit genommen und gleich 100 gesetzt wurde:

Name des Minerals	Fundort	Relativer Radiumgehalt	Relativer Joniumgehalt
Pechblende	Joachimsthal	100	100
Pechblende 1	Afrika	101.8	—
Pechblende 2	,,	107,7	99
Pechblende 3	,,	99,4	—
Thorianit	Java	98.7	—
Plumboniobit	Afrika	96,7	—
Autunit	Autun	27,5	—
Autunit 1	Guarda	41.7	92
Autunit 2	,,	20,6	82
Autunit 3	,,	68,0	87.5
Autunit 4	,,	24.9	75
Autunit 5	,,	38.6	76
Autunit	?	60,6	88
Carnotit	Colorado	91,6	—
Carnotit 1	Florida	71.5	—
Carnotit 2	,,	99.0	—
Rutherfordin 1	Afrika	86,8	—
Rutherfordin 2	,,	83.5	—
Rutherfordin 3	,,	66,3	—

Mit der Auslaugungstheorie steht unter Berücksichtigung der leichten Löslichkeit der Bleisalze im besten Einklange, daß nach den Untersuchungen von W. Marckwald und B. Keetmann (20) auch das Blei, das letzte Umwandlungsprodukt des Radiums im Autunit nicht nachweisbar ist. F. Soddy (21) erbrachte durch Beobachtung dreier $2\frac{1}{2}$ bis $3\frac{1}{2}$ Jahre alter sorgfältig gereinigter Urannitratlösungen, die 250 bis 400 g Uran enthielten, den direkten Beweis, daß sich aus Uran Radium bildet, und zwar ließ sich nachweisen, daß die Radiumproduktion mit dem Quadrate der Zeit wuchs, woraus man schließt, daß sich zwischen Uran und Radium nur eine langlebige Uebergangssubstanz vorfindet. Die mittlere Lebensdauer dieser Substanz ließ sich mit einem Fehler von ca. 20 % auf etwa 10000 Jahre schätzen.

b) In Gesteinen. α) In Eruptivgesteinen. Die Gesetze der chemischen Elementarzusammensetzung sind in der ganzen Reihe der eruptiven Gesteine außerordentlich strenge. Nicht nur hat jedes Element bei allen Eruptivgesteinen bestimmte, und in vielen Fällen sehr enge Grenzen seines Minimal- und Maximalvorkommens im eruptiven Gestein, sondern die Mengen der einzelnen Elemente beeinflussen sich untereinander derart, daß in allen eruptiven Gesteinen die Summe der darin enthaltenen Atome eine konstante Zahl ist (22). Da das Uran nun zu den Elementen gehört, deren obere Grenze ihrer maximalen Vorkommensmöglichkeit in einem eruptiven Gestein eine so niedrige ist, daß wir gewohnt sind, diese Elemente in den Analysen eruptiver Gesteine zu vermissen, und nach dem unter 2a Gesagten in jedem primären Material von erheblichem geologischen Alter das Radium an die Gleichgewichtsmenge Uran gebunden ist, sind die Radiumgehalte eruptiver Gesteine außerordentlich geringe. Da alle Elemente (also auch alle radioaktiven) in eruptiven Magmen enthalten sind (23) (denn alles, was es gibt, muß in eruptiven Magmen enthalten sein, denn alles andere entsteht aus präexistierenden Eruptivgesteinen durch mechanische oder chemische Zerstörung dieser), sagen die vielfach ausgeführten Bestimmungen der „Radioaktivität" von Gesteinen (24) durch Messung der Gesamt-, der α- oder γ-Strahlung über den eigentlichen Gehalt an Radium nichts Bestimmtes aus. Direkte quantitative Radiumbestimmungen in Gesteinen verdanken wir R. I. Strutt (25), J. Joly (26) und A. S. Eve (27). Danach schwankt der Radiumgehalt eruptiver Gesteine zwischen $0,30 \times 10^{-12}$ und $4,78 \times 10^{-12}$ g Radium (met) in 1 g Gestein, und ist im Mittel $1,7 \times 10^{-12}$ g Radium (met) pro 1 g Gestein. Eine außerordentlich genaue Untersuchung des Radium- (und auch Thorium-)gehaltes der Gesteine des Gotthardtunnels führte neuerdings nach seiner Schmelzmethode (siehe S. 991) J. Joly (26a) aus. Er fand den mittleren Radiumgehalt der Gesteine

des Gotthard-Massivs zu $3{,}5 \times 10^{-12}$ und des Finsteraargranits zu $6{,}7 \times 10^{-12}$ g Radium (Element) pro 1 g Gestein.

R. I. Strutt (28) trennte die mineralischen Bestandteile eines Granites durch schwere Flüssigkeiten, und konnte durch Untersuchung der einzelnen auf diese Weise erhaltenen Trennungspunkte nachweisen, daß das Radium in solchen Gesteinen nicht etwa die Erdalkalimetalle der Feldspäte begleitet, sondern sich in den akzessorischen schweren Bestandteilen und oft in den dunklen Glimmern und überhaupt den ersten Ausscheidungen vorfindet. Die genetischen Beziehungen zum Uran machen diesen Befund sehr erklärlich. Es sei in diesem Zusammenhange erwähnt, daß entgegen früheren Annahmen der Radiumgehalt nach dem Innern unseres Planeten vermutlich abnimmt. Außer der Tatsache, daß man Produkte vulkanischer Eruptionen, die sicher großen Tiefen entstammten, eisenreiche Basalte, ebenso wie die diesen wesensverwandten eisenreichen Meteore fast frei von Radium fand, sprechen hierfür die Berechnungen des Temperaturgradienten der Erde (29 s. S. 992).

β) In Sedimentgesteinen. Der Radiumgehalt der Sedimente ist etwa derselben Größenordnung wie der der Eruptivgesteine und schwankt nach Messungen von Strutt, Joly und Eve etwa zwischen $0{,}12 \times 10^{-12}$ und $2{,}92 \times 10^{-12}$ g Radium (met) pro 1 g Gestein, und ist im Mittel $1{,}1 \times 10^{-12}$ g Radium (met) pro 1 g Gestein. Doch gibt es entsprechend der viel weniger strengen Gesetzmäßigkeit in der chemischen Zusammensetzung der sedimentären Gesteine auch solche mit viel geringerem und namentlich auch viel höherem Radiumgehalte. Insbesondere zeichnen sich Tiefseesedimente durch erheblichen Radiumgehalt aus, der nach J. Joly (30) zwischen 6×10^{-12} bis 53×10^{-12} Radium (met) pro 1 g Substanz schwankt. Ganz neue Untersuchungen von A. L. Fletscher (30a), die an einem umfangreichen Material nach der Jolyschen Schmelzmethode (siehe S. 991) ausgeführt wurden, ergaben als mittleren Radiumgehalt sedimentärer Gesteine $1{,}4 \times 10^{-12}$ g Radium (met) pro 1 g Gestein. Dabei zeigten die verschiedenen Sorten der Gesteine nur sehr geringe Abweichungen von diesem Mittelwert.

Im engsten Zusammenhange damit steht der nicht unerhebliche Gehalt des Meerwassers (31) an Radium, der nach J. Joly zwischen $0{,}009 \times 10^{-12}$ g Radium (met) pro 1 g Wasser (indischer Ozean) bis $0{,}034 \times 10^{-12}$ g Radium (met) pro 1 g Wasser (Küste um Irland) schwankt, während A. S. Eve (32) im Ozean einen Radiumgehalt von $0{,}74 \times 10^{-12}$ g bis $1{,}50 \times 10^{-12}$ g Radium (met) in 1 g Wasser feststellt.

Die Gesamtmenge Radium im Weltmeer ist eine außerordentlich große, denn nimmt man die Masse der Ozeane zu $1{,}452 \times 10^{18}$ Tonnen an, so sind darin insgesamt 20×10^{9} g = 20000 Tonnen Radium (met) enthalten (33).

Die Anreicherung des Radiums aus so außerordentlich verdünnten Lösungen in den Tiefseesedimenten und auch den Sedimentgesteinen kommt im wesentlichen zustande durch die Mitwirkung von kolloidalen Substanzen, von denen einige für Radiumsalze ein außerordentliches Adsorptionsvermögen haben (34). Bei der Bildung der Tiefseesedimente sind es wohl die in den Meeresorganismen enthaltenen kolloidalen Substanzen, welche diese Aufgabe übernehmen, während bei der Bildung von Sedimentgesteinen wohl das kolloidale Kieselsäurehydrat das Radium adsorbierende Agens darstellt (35).

Aus demselben Grunde sind im allgemeinen verwitterte Gesteine erheblicher radioaktiv als die entsprechenden frischen Gesteine (36).

γ) In kristallinen Schiefern. Je nachdem die kristallinen Schiefer Eruptiv- oder Sedimentgesteinen entstammen (also Ortho- oder Para-Gneise, bezw. deren Analoga sind), werden sie in bezug auf ihren Radiumgehalt sich genau so verhalten, wie die Eruptiv- bezw. Sedimentgesteine, deren dynamische Metamorphosen sie sind. Denn ebenso, wie es beispielwseise bei einem eruptiven Gestein in bezug auf die chemische Elementarzusammensetzung ohne Belang ist, ob dasselbe als Massen-, Gang- oder Ergußgestein auftritt, so ist auch die zum kristallinen Schiefer führende dynamische Metamorphose eines Gesteines ohne Einfluß auf seine chemische Elementarzusammensetzung, also auch auf seinen Radiumgehalt; denn es sind ja dieselben Schmelzflüsse, die nur unter anderen äußeren Bedingungen zur Kristallisation gelangt sind.

c) In Mineralquellen. Obwohl die „Radioaktivität" von Mineralquellen in einer außerordentlich großen Zahl von Beispielen untersucht wurde, beschränken sich diese Untersuchungen doch zumeist auf die Feststellung der Anwesenheit von Radiumemanation und der Bestimmung dieses Gases in relativem elektrischem Maße (Ampère; elektrostatische Stromstärke-Einheiten, E.S.E.; Mache-Einheiten = E. S. E. $\times 10^{-3}$) und lassen die Feststellung und Bestimmung des Radiums selbst meistens außer Betracht. Auf indirektem Wege, durch Untersuchung der festen Quellenausscheidungen wurde die Anwesenheit des Radiums selbst nachgewiesen von J. Knett (37) in den Karlsbader Thermen, von H. Mache (38) in den Gasteiner Thermen, von C. Engler und H. Sieveking (39) in Baden-Badener Quellen, von

K. Aschoff (40) in den Quellen von Kreuznach, von H. W. Schmidt (41) in einer Anzahl Mineralquellen in Hessen, von I. Elster und H. Geitel (42) in Quellen in Baden-Baden, Nauheim, Wiesenbad, Battaglia, von E. Ebler und M. Fellner (43) in Mineralquellen von Bad Dürkheim (Rheinpfalz) und von I. Sterba (44) in Teplitz-schönauer Quellen, u. a. m. Quantitative Bestimmungen des Radiums, die als Maß für die Größenordnung derartiger Radium-Vorkommnisse dienen können, ergaben nach den Untersuchungen von E. Ebler und M. Fellner in der Dürkheimer Maxquelle (Rheinpfalz) $0,97 \times 10^{-10}$ g Radium (met) in 1 l Quellwasser.

In Quellwässern, die Sedimente bilden, reichert sich — wohl meistens als Folge der Adsorption der Radiumsalze durch kolloidale Substanzen (Kieselsäurehydrat, Metallhydroxyde) (45) — das Radium in den Quellensedimenten an. Die Dürkheimer Quellensedimente enthalten 1,76 bis $3,03 \times 10^{-10}$ g Radium (met) in 1 g Sediment (46), und diese Zahl dürfte in der Größenordnung auch für andere radiumhaltige Quellensedimente, von deren Mehrzahl quantitative Bestimmungen zurzeit nicht vorliegen, zutreffen.

Bei manchen radiumhaltigen Quellen, die zur Salzbereitung dienen, reichert sich das Radium in den dabei abfallenden Mutterlaugen an, und zwar um so mehr, je weniger das Quellwasser durch Sedimentierung an Radium verarmt. Nach E. Ebler und und M. Fellner (47) sind die Radiumgehalte einiger bekannter „Mutterlaugen" die folgenden:

Herkunft	spez. Gewicht	g Radium (met) in 1 g Lauge
Nauheim	1,3893 $\left\{\begin{matrix}15^0\\4^0\end{matrix}\right\}$	$0,225 \times 10^{-10}$
Dürkheim	1,3960 $\left\{\begin{matrix}18,5^0\\4^0\end{matrix}\right\}$	$0,046 \times 10^{-10}$
Kreuznach	1,2779 $\left\{\begin{matrix}14^0\\4^0\end{matrix}\right\}$	$0,017 \times 10^{-10}$
Münster a. St.	1,3047 $\left\{\begin{matrix}21,5^0\\4^0\end{matrix}\right\}$	$0,009 \times 10^{-10}$

3. Geschichte. Das Radium verdankt seine Entdeckung der photographischen Platte und der zwar sehr naheliegenden, aber, wie sich später zeigte, nicht zutreffenden Vermutung Becquerels, daß die Emission der metalldurchdringenden und photographisch wirksamen Röntgenstrahlen von der fluoreszierenden Glaswand der Vakuumröhren lediglich eine Begleiterscheinung jeder Fluoreszenzerscheinung, unabhängig von deren Ursache sei. Man untersuchte daraufhin eine große Anzahl phosphoreszierender, photolumineszierender und fluoreszierender Stoffe auf ihr Vermögen durchdringende photographisch wirksame Strahlen auszusenden, unter anderen auch die fluoreszierenden Uranylverbindungen. Man konnte tatsächlich bei vielen dieser Stoffe, insbesondere bei den Uranverbindungen das Vorhandensein einer derartigen Strahlung nachweisen. Aber bald konnte Becquerel selbst feststellen, daß diese „Radioaktivität" der Uranium- und auch der Thoriumverbindungen vollkommen unabhängig von der vorherigen Belichtung und der Fluoreszenz dieser Stoffe ist, sondern eine chemische, von ihrer Art und Stärke nach untrennbar mit dem Atome Uran, bezw. Thorium verbundene Eigenschaft ist, derart, daß jedes Gemisch und jede Verbindung, die Uranium oder Thorium enthält, eine dem Uran- bezw. Thoriumgehalt proportionale Intensität der Radioaktivität aufweist (48). Dieses Gesetz führte weiter gelegentlich der Untersuchung der abnorm stark aktiven Uranmineralien durch P. und S. Curie (49) und P. und S. Curie und G. Bemont (50) zur Entdeckung des Radiums. Die Auffindung dieses Elementes geschah weiterhin auf rein chemisch-analytischem Wege aus den abnorm stark aktiven Uranmineralien, wobei die Radioaktivität ähnlich der Spektralanalyse als treuer Führer diente.

Es bleibe nicht unerwähnt, daß man auf einem ganz anderen Wege, nämlich durch eingehende Untersuchungen über die Elektrizitäts-Zerstreuung in der Atmosphäre den radioaktiven Substanzen sehr nahe gekommen war; denn man hatte schon vor der Entdeckung des Radiums festgestellt, daß die Elektrizitätszerstreuung in der Atmosphäre zum Teil ihre Ursache in festen in der Erdrinde enthaltenen und in die Atmosphäre gelangenden Substanzen hat. Dieser Zweig der Forschung wäre auch ohne die Entdeckungen, die sich an die fluoreszierenden Uranverbindungen anschlossen, zur elektrischen Untersuchung von Erdarten, von Uranerzen und damit zum Tore des neuen Gebietes gelangt (51).

4. Darstellung und Verwendung. Die technische Darstellung (52) des Radiums geschieht aus entsprechend reichen Uranmineralien, insbesondere aus den früher wertlosen Rückständen von der Uranbereitung aus Uranpecherzen, nach chemisch-analytischen Trennungsmethoden, die zunächst auf eine Abtrennung des radiumhaltigen Baryums hinzielen. Die weitere Trennung des Radiums vom Baryum erfolgt nach den unter 2 (Analytische Chemie) beschriebenen speziellen Trennungsmethoden des Radiums vom Baryum, zurzeit noch ausschließlich durch die fraktionierte Kristallisation der Chloride, bezw. der Bromide. Die endgültige „Ausbeute" an reinem Ra-

diumsalz ist bei Verwendung von Uranpecherzrückständen als Ausgangsmaterial nicht sehr gut, denn man gewinnt nur etwa 40 % des im Erze enthaltenen Radiums in Form einer reinen Verbindung, während sich die restlichen 60 % auf etwa 20 Trennungsfraktionen von mehr oder weniger erheblichem Radiumgehalt verteilen (53). Vermutlich besser, aber der Oeffentlichkeit nicht bekannt sind die Ausbeuten bei der Verarbeitung solcher Erze, bei denen wie beim Chalcolith, Carnotit, radiumhaltigen Pyromorphit und Autunit beim Behandeln mit Säure (Salpetersäure) das gesamte Radium in Lösung geht. Eine große Ausbeute an Radium (und wahrscheinlich einen Preissturz des Radiums bedingend) verspricht die Verarbeitung der Nebenprodukte aus der Vanadinfabrikation aus Uran-Radium-haltigen Vanadinerzen. Während der Uranbedarf zurückgeht ist der Vanadinbedarf infolge der Entwickelung der Stahlindustrie (Vanadinstahle für Werkzeuge, Panzerplatten usw.) im ständigen Wachsen begriffen; da die meisten Vanadinerze radiumhaltig sind, häufen sich in den Vanadinbetrieben verhältnismäßig große Mengen von Radium an. Auch Quellensedimente, z. B. die von Kreuznach, werden auf angereicherte Radiumpräparate verarbeitet (54). Zur Anreicherung des Radiums aus Erzen läßt sich zweckmäßig die „fraktionierte Adsorption“ (55) verwenden. Der Preis des Radiums ist zurzeit noch sehr hoch; es kommt in reinen und in nur angereicherten Salzen des Radiums 1 mg Radium (Element) auf etwa 550 M. zu stehen (55 a).

Die Salze des Radiums finden Anwendung in der Medizin, und zwar in reinem oder hochkonzentriertem Zustande in geeigneten Fassungen montiert zu Bestrahlungszwecken (56). Verdünnte Lösungen reiner und auch wenig angereicherter Präparate werden zu Einspritzungen bei der Behandlung gewisser Geschwülste verwendet. Sehr schwach radiumhaltige Gemische endlich, z. B. natürliche Quellensedimente dienen zu Packungen. Die Hauptverwendung auf medizinischem Gebiete liegt in der ständigen Erzeugung der Radiumemanation, die schon medizinisches Handelsprodukt geworden ist, und sowohl zum Einatmen, als auch in künstlichen Lösungen zum Trinken dient.

Eine weitere Verwendung finden hochkonzentrierte und reine Radiumsalze im Gemisch mit phosphoreszierenden Substanzen, namentlich phosphoreszierendem Schwefelzink. Solche Gemische leuchten durch die stetige Bestrahlung des beigemischten Radiumsalzes dauernd, auch ohne vorherige Belichtung und finden für allerhand Zwecke (Zifferblätter von Uhren, Kompasse, Wegmarkierungen usw.) gewerbliche Anwendung.

Eine vorgeschlagene Verwendung von Radiumverbindungen, und auch anderen radioaktiven Stoffen zur Ableitung der Elektrizität von Ballonkörpern (57) hat sich in der Praxis bisher keinen Eingang verschafft.

5. Formarten. Die Existenz des elementaren, metallischen Radiums hatte vom chemischen Standpunkt aus ein besonderes Interesse, da bisweilen die Möglichkeit in Betracht gezogen wurde, das Radium sei kein Element, sondern ein — vielleicht Helium enthaltendes — verhältnismäßig beständiges, in langsamer, aber stetiger Zersetzung begriffenes „Radikal“, dessen Salze zu den Salzen der Erdalkalimetalle in ähnlicher Beziehung stünden, wie etwa die Salze des Ammoniums zu den Salzen der Alkalimetalle. Da das „Ammonium“ der Erdalkalireihe das „Diammonium“ (Hydrazin) ist, hätte man an ein Helium-Analogon des Hydrazins denken können. Der experimentelle Nachweis jedoch, daß auch das elementare (metallische) Radium ohne Einbuße seiner radioaktiven Eigenschaften als vollkommenes Analogon des metallischen Baryums existenzfähig ist, nahm allen solchen Anschauungen den Boden. P. Curie und A. Debierne (58) stellten durch Elektrolyse wässeriger reiner Radiumchloridlösungen mittels Quecksilberkathoden zunächst Radiumamalgam dar und destillierten aus diesem das Quecksilber unter vermindertem Druck in einer Wasserstoffatmosphäre ab, wobei reines metallisches Radium hinterblieb. Es stellt ein glänzendweißes Metall dar, das viel flüchtiger als Baryum ist und an der Luft infolge einer außerordentlich großen Neigung zur Nitridbildung rasche Zersetzung erleidet. E. Ebler (59) gewann durch Auflösen eines etwa 9 % Radiumcarbonat enthaltenden Radium-Bariumcarbonats in wässeriger Stickstoffwasserstoffsäure zunächst ein entsprechend Radiumazid enthaltendes Baryumazid und bewirkte weiterhin durch Erhitzen dieses im Vakuum einen Zerfall im Sinne der Gleichung:

$$Ra(N_3)_2 = Ra + 3N_2$$

wodurch ein etwa 9 prozentiges metallisches Radium-Barium von normaler Aktivität in Form eines Metallspiegels erhalten wurde.

Radiumamalgam ist schon seit längerer Zeit bekannt. Nach der von Curie und Debierne gelegentlich der Darstellung des metallischen Radiums angewandten elektrolytischen Methode hatten schon früher A. Coehn (60) und E. Wedekind (61) baryumhaltiges Radiumamalgam hergestellt. W. Marckwald (62) zeigte, daß man durch Behandlung von Radium-Baryumchloridlösungen mit Natriumamalgam radiumhaltiges

Baryumamalgam gewinnen kann, und daß das Verhältnis Ra/Ba im Amalgam um ein Vielfaches größer ist, als in der wässerigen Lösung, von der man ausging.

6. Elektrochemie. Wir schreiben dem Radium das Doppelte des 113,2 betragenden H-Aequivalentes zu auf Grund der weitgehenden Analogien, die die Verbindungen des Radiums mit denen des Baryums zeigen und nehmen in den Lösungen der Radiumsalze die Existenz des 2 wertigen Radium-Kations an.

F. Kohlrausch und F. Henning (63) bestimmten unter Verwendung von ca. 8 mg $RaBr_2 + 2H_2O$ das elektrolytische Leitvermögen dieses Salzes in Konzentrationen zwischen $^1/_{20}$ und $^1/_{12\,000}$ n-Lösungen und fanden es unter Zugrundelegung des Atomgewichts 225 für Radium völlig normal und analog der Leitfähigkeit der Baryumsalze. Das Aequivalent-Leitvermögen für unendliche Verdünnung wurde bei 18° unter Zugrundelegung Ra = 225 zu etwa 125 bis 126 gefunden. Daraus ergibt sich für die Ionenbeweglichkeit des (halben) Radiumatoms in Wasser:

$$l_{Ra/2} = 57{,}4; \text{ und analog für:}$$
$$l_{Ba/2} = 55{,}5.$$
$$l_{Sr/2} = 51{,}7.$$
$$l_{Ca/2} = 51{,}8.$$

Auch diese Untersuchungen sind eine Bestätigung des auf gewichtsanalytischem Wege bestimmten Atomgewichtes; denn bei der Annahme des Atomgewichtes Ra = 258 würde $l_{Ra/2}$ mit 68 aus der Reihe der Ionenbeweglichkeiten des Baryums, Strontiums und Calciums bedeutend herausfallen.

7. Spezielle Chemie (Salze). Die Salze des Radiums sind in jeder Hinsicht vollkommene Analoga der Baryumsalze. Radiumchlorid und -bromid sind in Wasser löslich, jedoch etwas schwerer, als die analogen Baryumsalze. Radiumchlorid und -bromid kristallisieren, wie die Baryumsalze mit 2 Mol. Kristallwasser, und sind mit den Baryumsalzen isomorph. Radiumchlorid verliert schon langsam bei 100°, rascher bei 120° bis 130° das ganze Kristallwasser, und läßt sich bis 200° erhitzen, ohne sein Gewicht zu ändern (64). Radiumchlorid und -bromid sind unlöslich in konzentrierten Säuren und absolutem Alkohol. Radiumnitrat, $Ra(NO_3)_2$, ist in Wasser löslich, kann aber durch fraktionierte Kristallisation nicht vom Baryumnitrat getrennt werden. Radiumsulfat ist noch schwerer löslich als Baryumsulfat und wird auch aus verdünnten Radiumlösungen, in denen das Löslichkeitsprodukt des Radiumsulfats nicht erreicht ist, bei der Fällung von Baryumsulfat mitgerissen (65).

Radiumchlorid ist paramagnetsich; seine Magnetisierungszahl, k ist $+ 1{,}05 \times 10^{-6}$, im Gegensatz zum diamagnetischen Baryumchlorid, dessen Magnetisierungszahl $k = -0{,}40 \times 10^{-6}$ ist (66).

Die Isomorphie der Bromide des Baryums und Radiums hat F. Rinne (67) durch kristallographische Messungen bewiesen:

$RaBr_2 + 2H_2O$: monoklin; Achsenverhältnis: $a:b:c = 1{,}4485:1:1{,}1749.\quad \beta_{(ac)} = 65^0\,24'.$

$BaBr_2 + 2H_2O$: monoklin; Achsenverhältnis: $a:b:c = 1{,}4449:1:1{,}1656.\quad \beta_{(ac)} = 66^0\,30'\,30''.$

Ueber eine eigentümliche, offenbar durch die Strahlung verursachte Hydrolyse reinen Radiumbromides an der Luft, die zuletzt unter Abspaltung allen Broms bis zum Radiumcarbonat führt (wobei die Präparate, ohne natürlich Einbuße an Radium zu erleiden, $^1/_3$ an Gewicht verlieren), berichtet W. Ramsay (68).

Radiumazid, $Ra(N_3)_2$ (das aber noch 91 % Baryumazid enthielt) stellte E. Ebler (69) durch Auflösen des Carbonates in der ausreichenden Menge Stickstoffwasserstoffsäure und Eindunsten der erhaltenen Lösung im Vakuum über Schwefelsäure dar. Die vermutungsweise ausgesprochene Ansicht, daß sich höherprozentige Radiumazide unter dem Einflusse ihrer eigenen Strahlung zersetzen, bestätigte Herchfinkel (70).

8. Analytische Chemie. 8a) Quantitative Bestimmung. Außer durch die dem Baryum völlig analogen Fällungsreaktionen und durch die später zu beschreibenden sehr charakteristischen Spektralreaktionen (Flammenfärbung, Flammen- und Funkenspektrum), welche Kriterien zur Erkennung und Bestimmung des Radiums außer in dem wichtigen Falle der direkten gravimetrischen Atomgewichtsbestimmungen nicht angewendet werden, weil sie viel zu viel von der kostbaren Substanz bedürfen, kann das Radium durch seine speziellen radioaktiven Eigenschaften, bezw. die seiner Umwandlungsprodukte erkannt und auch quantitativ bestimmt werden.

Zum Nachweise des Radiums dient die charakteristische Zersetzungsgeschwindigkeit der Radiumemanation und der bei der Zersetzung dieser sich bildenden „aktiven Beschläge“. Die Zersetzung der Emanation verfolgt man meistens in Verbindung mit der quantitativen Bestimmung des Radiums, indem man die zu untersuchenden Substanzen in Lösung bringt, und diese Lösungen so lange sich selbst überläßt, bis sich das Gleichgewicht zwischen Radium und Radiumemanation eingestellt hat. Dies ist nach je 30 Tagen erreicht; man kann die Wartezeit abkürzen, indem man die völlig entemanierten Lösungen eine gemessene Zeit nach dem Entfernen der Emanation zur Messung verwendet und durch Berechnung

auf Grund der Wiederbildungsgeschwindigkeit aber mit Hilfe bequemer Tabellen von L. Kolowrat (71) (Chemiker-Kalender f. 1912. II. Bd. S. 347) den Prozentsatz der vorhandenen von der maximalen Emanationsmenge ermittelt. Darauf wird nun entweder durch Hindurchlassen eines Luftstromes in geeigneten Gefäßen (72) oder durch Auskochen im Vakuum (73) die gesamte vorhandene Emanationsmenge mit Luft gemischt in eine evakuierte Ionisierungskammer übergeführt und darin der durch die Emanation unterhaltene Sättigungsstrom gemessen und die Zersetzung der Emanation durch stetige elektrometrische Bestimmungen einige Tage verfolgt. Die Radiumemanation zersetzt sich wie jede andere einheitliche radioaktive Substanz nach einem Geschwindigkeitsgesetz 1. Ordnung im Sinne der Gleichung:

$$\frac{N_t}{N_o} = \frac{J_t}{J_o} = e^{-\lambda . t}$$

worin N_t und N_o die zu einer Zeit t und o vorhandenen Mengen Emanation, J_t und J_o die den zu diesen Zeiten vorhandenen Emanationsmengen proportionalen Sättigungsstromstärken sind, und λ die Geschwindigkeitskonstante für die Reaktion darstellt, die, wenn t in Sekunden gemessen wird, für Radiumemanation den Wert $2{,}085 \times 10^{-6}$ hat (74). Aus den beobachteten N_t bezw. J_t-Werten ermittelt man die beobachtete Geschwindigkeitskonstante aus der Gleichung

$$\lambda = \frac{1}{t} . \ln \frac{J_o}{J_t}$$

und weiter die „Halbierungskonstante" H. C., d. i. die Zeit, in der sich die radioaktive Substanz gerade zur Hälfte zersetzt aus der Beziehung:

$$H.C = \frac{1}{\lambda} . \ln 2$$

H. C. ist für Radiumemanation = 3,85 Tage (74).

Zur Bestimmung der Radiummenge ermittelt man im Kondensator den Sättigungsstrom, der unmittelbar nach dem Ueberführen der gesamten im Gleichgewicht vorhandenen Emanationsmenge allein in der Ionisierungskammer unterhalten wird.

Weiterhin führt man unter denselben Bedingungen einen völlig analogen Versuch mit einer Radiumlösung von bekanntem Gehalte aus; sodann verhalten sich die beiden Sättigungsströme wie die beiden Radiummengen. In Ermangelung einer Radium-Standard-Lösung kann man sich als Vergleichssubstanz einer abgewogenen Menge eines Uranerzes bedienen, dessen Urangehalt gravimetrisch bestimmt wurde, indem man aus dem Gleichgewicht zwischen Uran und Radium:

$$1 \text{ g Uran} = 3{,}4 \times 10^{-7} \text{ g Radium}$$

oder unter Benutzung der Tabellen auf S. 983 und 984 den Radiumgehalt ermittelt.

Man kann auch ganz auf das Vergleichspräparat verzichten, und aus den von Curie und Duane (75) ermittelten Beziehung, daß die mit 1 g Radium (met) im Gleichgewichte befindliche Emanationsmenge einen Sättigungsstrom von $5{,}3 \times 10^5$ ESE. unterhält, aus der gemessenen Sättigungsstromstärke die Radiummenge ermitteln; es entspricht danach eine Sättigungsstromstärke von 1 ESE. = $18{,}87 \times 10^{-7}$ g Radim (met). Dabei sind aber in der weiter unten beschriebenen Weise die Dimensionen der Ionisierungsräume unbedingt zu berücksichtigen, sonst werden die Bestimmungen falsch.

Besser ist es sich eines Curieschen Zylinderkondensators von den bestimmten Dimensionen 12,5 cm Höhe; 6,7 cm innerer Durchmesser zu bedienen, denn in einem solchen unterhält die mit 1 g Radium (met) im Gleichgewicht befindliche Radiumemanation einen maximalen Sättigungsstrom von $3{,}5 \times 10^6$ E.S.E. (Curie (75a)). — Unter diesen speziellen Bedingungen entspricht die Unterhaltung eines maximalen Sättigungsstromes von 1 ESE. einer Emanationsmenge, die sich mit $2{,}86 \times 10^{-7}$ g Radium (met) im Gleichgewicht befindet.

Bei allen diesen Untersuchungen ist zu beachten, daß sich unmittelbar nach dem Ueberführen der Radiumemanation in die Ionisierungsräume aus der Emanation aktive feste Niederschläge bilden, deren Strahlung mit zur Unterhaltung des Stromes beiträgt und deren Wirkung für die Emanation allein in Abzug zu bringen ist.

Eine Formel von E. Rutherford (76) gibt annähernden Aufschluß über die Geschwindigkeit des Anwachsens der Aktivität der aus Radiumemanation entstehenden aktiven Beschläge innerhalb kurzer Zeiten (bis etwa 30 Minuten) nach Einführung der Emanation in die Ionisierungsgefäße und gestattet den durch die „Emanation allein" unterhaltenen Strom zu ermitteln:

$$J'_t = J_o \left[(1 - e^{-\lambda_1 . t}) + c\,(1 - e^{\lambda' . t}) \right]$$

Hierin bedeutet

J_o die zur Zeit t = o von der „Emanation allein",

J'_t die zur Zeit t von den „aktiven Beschlägen allein" bewirkte Ionisation.

$\lambda_1 = 48 \times 10^{-4} \times \sec^{-1}$ }
$\lambda' = 3{,}8 \times 10^{-4} \times \sec^{-1}$ } sind Konstanten
$c = 0{,}72$

Eine bequeme Tabelle zur direkten Ablesung von J'_t und $\frac{J_0}{J'_t}$ innerhalb der ersten 15 Min. gibt H. W. Schmidt (77 Chemiker-Kalender für 1912, II. Bd., S. 339).

Bei der Messung des Sättigungsstromes ist auch der Druck im Ionisierungsgefäß zu beachten und eventuell für mittelgroße Gefäße nach der Formel:

$$\varepsilon = i\,[0{,}0007\,(760-p) + 0{,}002 \cdot (t - 15)]$$

zu korrigieren (78), worin ε das dem gemessenen Strome hinzuzufügende Korrektionsglied ist, um den Strom auf 760 mm Quecksilberdruck und 15° zu korrigieren, wenn zur Zeit der Messung der Druck = p, und die Temperatur = t° betrug. Die Korrektion kann bis 2% des gemessenen Wertes ausmachen.

Die Methode der direkten Umrechnung des Sättigungsstromes in die Radiummenge hat den Nachteil, daß der Sättigungsstrom auch von den Gefäßdimensionen abhängt. Duane und Laborde (79) haben gefunden, daß der Strom in einem Kondensator von dem Verhältnis dessen innerer Oberfläche (s) zu seinem Volumen (v) abhängt. Die Anfangssättigungsstromstärke J_o, bezw. die maximale Sättigungsstromstärke J_{max} (die etwa 3 Stunden nach Einführung der Emanation in einen Kondensator auftritt) gemessen in E.S.E. in einem Zylinderkondensator von der inneren Oberfläche s und dem Volumen v, unterhalten von der Emanationsmenge, die von 1 g Radium (met) in 1 Sekunde erzeugt wird (g.-sec.-Einheit der Emanationsmenge) ist gegeben durch die Formeln:

$$J_o = 5{,}19\left(1 - 0{,}517 \cdot \frac{s}{v}\right)$$

und $$J_{max} = 13{,}15\left(1 - 0{,}572 \cdot \frac{s}{v}\right).$$

Um den Strom auf die mit 1 g Radium (met) im Gleichgewichte befindliche Emanationsmenge (Einheit = 1 „Curie") zu beziehen, hat man diese Werte nur mit $\frac{1}{\lambda} = 479\,600$ zu multiplizieren. λ ist die Radioaktivitätskonstante der Radiumemanation. $\lambda = 2{,}085 \times 10^{-6} \times sec^{-1}$.

Die Methode des Vergleichs mit Standardlösungen ist im allgemeinen vorzuziehen, wenn man über zuverlässige Standardlösungen verfügt. Zurzeit noch weichen die in den verschiedenen Laboratorien gebräuchlichen Radiumnormallösungen um etwa 20% voneinander ab, und zur Verwendung der Standard-Mineralien ist zu erwähnen, daß die Konstanz des Verhältnisses Ra/Ur in Uranerzen, wie die Versuche von E. Gleditsch und W. Marckwald und Al. S. Russell (siehe oben S. 984) zeigen auch keine absolute ist.

Zur Abstellung dieser Kalamität wurde auf dem Internationalen Kongreß für Radiologie und Elektrizität in Brüssel (September 1910) eine Kommission erwählt, deren Aufgabe es ist, die Anfertigung von Radium-Normalmaßen in die Wege zu leiten (80).

Eine einfache sehr viel angewandte Methode der Mengenbestimmung des Radiums beruht auf der Messung der γ-Strahlung der im Gleichgewicht (das sich nach etwa einem Monat stets eingestellt hat) vorhandenen Menge Radium C und Vergleich dieser Strahlung mit einem Radiumpräparat von bekanntem Gehalte unter denselben Bedingungen. Diese von A. S. Eve (81) stammende Methode ist aber nur anwendbar bei Abwesenheit von Thoriumprodukten, denn unter diesen befindet sich das Thorium D, das ebenfalls sehr durchdringende γ-Strahlen liefert. Durch genügend dicke Bleischichten ist auch dafür zu sorgen, daß die γ-Strahlung des Radium E absorbiert wird. Zur Messung bedient man sich allseitig 1 cm dicker Bleischachteln mit übergreifendem Deckel, dessen Fuge durch einen umgelegten Bleidraht zugeschmolzen werden kann (82). Damit diese Methode exakte Resultate liefert, ist es notwendig, daß der Radiumgehalt der beiden Präparate etwa derselben Größenordnung ist und daß die Verteilung der Präparate ungefähr dieselbe ist.

8b) Qualitative Bestimmung. Ein viel angewandter, zuverlässiger und bequemer Nachweis des Radiums beruht auf der sehr charakteristischen Zersetzungsgeschwindigkeit der aktiven Beschläge, die nach langer Exposition sich aus Radiumemanation auf festen Körpern absetzen.

Diese Zersetzung verläuft nach E. Rutherford (83) im Sinne der Gleichung

$$J_t = J_o \cdot \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_3} \cdot e^{-\lambda_3 \cdot t} - \frac{\lambda_3}{\lambda_2 - \lambda_3} \cdot e^{-\lambda_2 \cdot t}\right)$$

worin λ_2 die Radioaktivitätskonstante des Radium B $= 5{,}38 \times 10^{-4} \times sec^{-1}$, und λ_3 die Radioaktivitätskonstante des Radium C $= 4{,}13 \times 10^{-4} \times sec^{-1}$ ist.

Nach Einsetzen dieser Konstanten erhält man:

$$J_t = J_o \cdot (4{,}3 \cdot e^{-\lambda_3 \cdot t} - 3{,}3\; e^{-\lambda_2 \cdot t})$$

eine Formel, die mit einer von P. Curie und J. Danne (84) mit Konstanten von Duane (85) aufgestellten Formel:

$$J_t = J_o \cdot [a \cdot e^{-\lambda_1 \cdot t} - (a-1) \cdot e^{-\lambda_2 \cdot t}]$$

fast identisch ist.

$\lambda_1 = 4{,}13 \times 10^{-4} \times sec^{-1}$, $\lambda_2 = 5{,}38 \times 10^{-4} \times sec^{-1}$; a = 4,2).

Für die praktische Bestimmung selbst aktiviert man entweder direkt die Innenwände der Meßkondensatoren, oder besser konzentriert man nach dem Vorgange E. Rutherfords (86) die aktiven Niederschläge auf kleine Flächen, (z. B. Drähte) indem man letztere, während sie der Emanation ausgesetzt sind, auf ein hohes negatives Potential lädt. Praktische Vorrichtungen hierfür beschrieben speziell für die Untersuchungen von Quellensedimenten J. Elster und H. Geitel (87).

Die zuletzt beschriebene Aktivierungsmethode ist der Aktivierung der ganzen Innenwände der Ionisierungsräume vorzuziehen, weil beim längeren Verweilen von Radiumemanation in den Meßkondensatoren bisweilen beträchtliche Mengen von Emanation durch kolloidale Substanzen, wie Bernstein, Hartgummi usw. adsorbiert werden, wodurch die Abklingung der Aktivität der „Beschläge" schwankend und unrein wird (88).

Bisweilen ist es erwünscht, vor Ausführung bestimmter Messungen das Radium aus einer größeren Menge zu untersuchenden Materials zu konzentrieren. In solchen Fällen ist es zweckmäßig, nach Zusatz kleiner Mengen von Baryumchlorid mit einem Überschuß von Schwefelsäure das Sulfat des Radiums zusammen mit dem Baryumsulfat auszufällen, die gemischten Sulfate durch Kochen oder Schmelzen mit Soda in Karbonate überzuführen und deren Lösung in verdünnter Säure zur Untersuchung zu verwenden (89). Man überzeuge sich jedoch in jedem einzelnen Falle durch Wiederholung der Sulfatfällung und Prüfung aller Filtrate, ob auch alles Radium ausgefällt wurde, denn bisweilen fällt Radiumsulfat, selbst bei Gegenwart von Baryumsulfat nicht vollständig aus (90).

Um solche Aufschließungen zu vermeiden, die umständlich sind und immer die Gefahr in sich bergen, daß Radium in die nicht zur elektrischen Messung gelangenden Trennungsanteile kommt, empfehlen speziell für Mineralienuntersuchung W. Marckwald und Al. S. Russell (91) die Auskochung der Emanation aus einer Lösung in konzentrierter Schwefelsäure vorzunehmen, worin sich auch Baryumsulfat auflöst.

Es ist bei allen derartigen Bestimmungen zu beachten, daß bei der langsamen Fällung von Baryum- und Radiumsulfat ein Teil der Sulfate fein suspendiert bleibt und in diesem Zustande wesentliche Mengen von Radiumemanation adsorbiert und sehr langsam abgibt (92).

Um diese Uebelstände und auch die Gefahr der Einschleppung von Radium zu vermeiden, treibt J. Joly (93) die Radiumemanation durch Schmelzen des gepulverten Materiales mit Soda-Potasche bei ca. 1100° im geschlossenen Raume aus.

Noch einfacher und zuverlässiger, weil jeden Zusatz und jede chemische Operation vermeidend, gelingen Radiumbestimmungen in Mineralien, durch Erhitzen dieser für sich in einer Quarzröhre im elektrischen Ofen im absoluten Vakuum, unter stetem Abpumpen der Radiumemanation mit einer Quecksilberpumpe. Die gesammelten abgepumpten Gase, die die Emanation enthalten, werden sodann in einen Ionisierungsraum übergeführt (Ebler).

8c) Trennung des Radiums vom Baryum. Diese Trennung ist von besonderer Wichtigkeit, da nach dem Vorhergehenden das Radium stets zunächst mit dem Baryum zusammen abgeschieden wird. Bei der weitgehenden Ähnlichkeit im chemisch-analytischen Verhalten der Radium- und Baryumsalze ist es klar, daß alle diese Trennungsmethoden nur Fraktionierungsverfahren sein können, die nur bei öfterer systematischer Wiederholung zu zwei reinen Endfraktionen führen.

S. Curie (94) benutzte zuerst den Löslichkeitsunterschied der Chloride von denen das Radiumchlorid das schwerer lösliche ist und das sich deshalb bei der fraktionierten Krystallisation bei den schwerer löslichen Partien anreichert. Analog, nur durch größeren Löslichkeitsunterschied rascher zum Ziele führend verhalten sich die Bromide (95). Die Beobachtung von W. Marckwald (96), daß sich beim Schütteln von Radiumsalzlösungen mit Radiumamalgam ein baryumhaltiges Radiumamalgam bildet, worin das Verhältnis Ra/Ba größer ist als in der Ausgangslösung, läßt sich durch Auflösen des aktiven Amalgams und Wiederholen der Amalgambildung mit der erhaltenen Lösung ebenfalls zu einer Anreicherung des Radiums verwenden. A. Coehn (97) zeigte, daß man diese Radiumamalgambildung sehr zweckmäßig durch Elektrolyse methylalkoholischer Lösungen von Radiumbaryumsalz unter Verwendung von Kathoden aus amalgamiertem Zink, und von Anoden aus Silber bewerkstelligen kann. B. Brauner (98) schlug vor die verschiedene Einstellung des Gleichgewichtes:

$$RSO_4 + Na_2CO_3 \rightleftarrows RCO_3 + Na_2SO_4$$

je nachdem R = Radium oder Baryum ist, zur Anreicherung des Radiums zu verwenden, indem man nach Entfernung des Alkalisulfates mit verdünnter Säure das gebildete Erdalkalikarbonat herauslöst. O. Brill (99) zeigte, daß man die Karbonate von Baryum, Strontium und Calcium durch verschieden starkes Erhitzen einzeln zerlegen kann; deshalb machte A. Thiel (100) den weiter nicht experimentell geprüften Vorschlag, die verschiedene Zersetzungstemperatur der Karbonate des Radiums und des Baryums zur Anreicherung zu benutzen.

A. Stock und H. Heynemann (101) zeigten, daß man Radium von Baryum durch

fraktionierte Sublimation der Bromide im Vakuum trennen kann, indem das Radiumbromid schwerer flüchtig ist, als das Baryumbromid, die Sublimationsrückstände mithin radiumreicher sind, als das Ausgangsmaterial.

E. Ebler und M. Fellner (102) reichern Radium durch „fraktionierte Adsorption" an, den Umstand benutzend, daß viele kolloidale Substanzen ein außergewöhnlich hohes Adsorptionsvermögen für Radiumsalze haben, derart, daß aus Radium-Baryumsalzlösungen vielmehr Radium, als Baryum adsorbiert wird. Durch Verwendung solcher Kolloide, die sich nach erfolgter Adsorption leicht wieder entfernen lassen (wie z. B Kieselsäure durch Verflüchtigung als Siliciumfluorid oder durch Dialyse und Elektrolyse) kann man die Adsorption zu einer „fraktionierten" gestalten.

9. Thermochemie (Umwandlung). Als instabiles Gebilde gibt das Radium, während es durch verschiedene (ebenfalls unbeständige) Zwischenstufen einem endgiltigen chemischen Gleichgewichtszustand, dessen einer Bestandteil das Blei zu sein scheint, zueilt, beträchtliche Mengen von Energie, zunächst in Form von Elektronenstrahlungen ab, durch deren Absorption im Salze selbst und in dem umgebenden Medium Wärme und kurzwellige elektromagnetische Strahlung (γ-Strahlung ?) entsteht. Da man auch die letztere durch geeignete dicke Absorptionsschichten in Wärme überführen kann, so ist die in geeigneter Apparatur gemessene Gesamtwärmeabgabe des Radiums das beste Maß für die gesamte beim Zerfalle abgegebene Energie. Die neuesten und offenbar auch genauesten Messungen dieser Wärmeentwickelung an reinstem Radiumsalz gemessen stammen von E. v. Schweidler und V. F. Heß (103). Diese Forscher bestimmten in einem Differentialkalorimeter unter Verwendung von 1,0523 g reinem wasserfreien Radiumchlorid das 99,3% $RaCl_2$ und mithin 0,7951 g metallisches Radium enthielt die von 1 g Radium (met) im Gleichgewichte mit seinen Umwandlungsprodukten in der Stunde entwickelte Wärmemenge zu 118,0 Grammkalorien, mit einer Unsicherheit von 1%. Diese Unsicherheit rührt nicht von Beobachtungsfehlern, sondern daher, daß der Gehalt des verwendeten Präparates an Radium auf ½%, und der Gehalt des Präparates an den langlebigen Umwandlungsprodukten des Radiums, insbesondere an Polonium infolge des jugendlichen Alters des Präparates (etwa 2 Jahre), nicht genau angegeben werden konnte.

Einen Überblick über die früheren, weniger genauen Bestimmungen gibt folgende Zusammenstellung (104):

Autoren	Präparat	Methode	Wärme Q $\left(\frac{cal}{Stde}\right)$
P. Curie u. A. Laborde (105)	1 g 17 % iges Bromid	—	100
Runge u. J. Precht (106)	—	—	105
E. Rutherford u. H. T. Barnes (107)	30 mg reines Bromid	Differential-Luftthermometer	110
J. Precht (108)	34 mg reines Bromid	Eiskalormeter	113,3
K. Angström (109)	90 mg reines Bromid	Elektr. Kompensationskalorimeter	117
J. Precht (110)	25 mg reines Bromid	Eiskalorimeter	134

Die genaue Kenntnis der von einer bestimmten Menge Radium abgegebenen Wärmemenge in Verbindung mit der Kenntnis des oben (S. 984) mitgeteilten mittleren Radiumgehaltes der Gesteine bildet die wesentliche Grundlage für die Neuberechnung des Wärmehaushaltes der Erde. Nach den Rechnungen von E. Rutherford und Kelvin (111) genügt eine jährliche Wärmeentwicklung von $2,2 \times 10^{-7}$ Grammkalorien pro Jahr und pro ccm Erdsubstanz um die Temperatur der Erde konstant zu halten; da nun nach den soeben mitgeteilten kalorimetrischen Messungen 1 g Radium pro Jahr rund 1034000 Grammkalorien Wärme im radioaktiven Gleichgewicht entwickelt, würden etwa $2,1 \times 10^{-13}$ g Radium (met) pro ccm Erdmasse genügen diesen Wärmebedarf zu entwickeln. Unter der Annahme eines mittleren spezifischen Gewichts von 2,7 für die bekannte feste Kruste der Erde, und Berücksichtigung des weiter oben (S. 984) mitgeteilten Radiumgehaltes von im Durchschnitt etwa $1,7 \times 10^{-12}$ g Radium (met) pro 1 g Gestein, ermittelt sich aber der durchschnittliche Radiumgehalt in 1 ccm der bekannten festen Erdrinde zu etwa $4,6 \times 10^{-12}$ g Radium (met), also einer bedeutend größeren Menge, als zur Deckung des Wärmeverlustes notwendig ist. Man muß deshalb mit R. I. Strutt, (112) A. S. Eve (113) und J. Koenigsberger (114) annehmen, daß die Hauptmenge des Radiums nur in einer dünnen Oberflächenschale der Erdrinde enthalten ist, oder mit M. Levin (115) die Annahme machen, daß unter den Bedingungen im Innern der Erde der Zerfall des Radiums langsamer, oder unter Energieaufnahme gar in umgekehrter Richtung vor sich geht.

Die Umwandlung des Radiums führt unter Verlust eines α-Partikels (das ein mit dem doppelten Elementarquantum der Elektrizität positiv geladenes Heliumatom ist) (116) zunächst zu der gasförmigen Radiumemanation (Niton) einem Vertreter der Edelgase (siehe Heliumgruppe).

Die Radiumemanation ist in den Gasen enthalten, die beständig von festen und gelösten Radiumsalzen abgegeben werden. Radiumlösungen von hinreichend großer Konzentration zeigen eine ständige Entwicklung von Wasserstoff und Sauerstoff von der ungefähren Zusammensetzung des Knallgases (117).

Die Radiumemanation, und deren weitere Zersetzungsprodukte, die alle feste Körper sind, häufen sich in jedem frisch dargestellten Radiumpräparat bis zur Einstellung eines Gleichgewichtes an. Aus diesem Grunde ist jedes Radiumpräparat komplexer Natur, was man namentlich durch die Analyse seiner Strahlung erkennen kann.

Die erste Umwandlung des Radiums in die Radiumemanation erfolgt wie alle radioaktiven Umwandlungen nach dem Reaktionsgesetz erster Ordnung mit einer unabänderlichen Geschwindigkeitskonstanten $\lambda = 1{,}1 \times 10^{-11} \times \sec^{-1}$; die mittlere Lebensdauer des Radiumatoms beträgt danach 2900 Jahre und seine Halbwertskonstante H. C. = 2000 Jahre.

1 g Radium (met) ist im Gleichgewicht mit 0,57 cbmm Radiumemanation bei 0° und 760 mm Druck, und erzeugt unter denselben Bedingungen pro Tag 0,37 cbmm Helium (118).

10. Photochemie. a) F l a m m e n f ä r b u n g. Radiumsalze erteilen der nichtleuchtenden Flamme eine reine Purpurfärbung (119).

b) S p e k t r u m (120). Das Funkenspektrum des Radiums ist außerordentlich charakteristisch und wurde schon vermittels der ersten C u r i e schen Präparate von E. D e m a r c a y (121) eingehend untersucht. Das Flammenspektrum untersuchten R u n g e und Precht (122). Auch die Flammenspektralreaktion ist sehr charakteristisch und empfindlich. Im Flammenspektrum tritt besonders eine helle blaue Linie von der Wellenlänge $\lambda = 482{,}6\ \mu\mu$ auf, die analog ist den ebenfalls hellen Linien von den Wellenlängen:

$\lambda = 553{,}6\ \mu\mu$ im Baryumspektrum
$\lambda = 460{,}7\ \mu\mu$ im Strontiumspektrum
$\lambda = 422{,}6\ \mu\mu$ im Calciumspektrum.

c) S t r a h l u n g. Die charakteristischste vom Radium selbst emittierte Strahlenart ist seine α-Strahlung, die wirklich dem Radium selbst zuzuschreiben ist, zu der sich aber bei jedem Radiumpräparat in Praxi die Strahlungen seiner sämtlichen Umwandlungsprodukte hinzugesellten. Die α-Strahlen des Radiums haben in Luft von Atmosphärendruck einen Wirkungsbereich (Reichweite) von 3,5 cm, und werden dementsprechend von einer Schicht von $16{,}1 \times 10^{-4}$ cm Aluminium vollständig zurückgehalten. Der Absorptionskoeffizient der β-Strahlung in Aluminium ist $\mu = 312 \times \mathrm{cm}^{-1}$, woraus folgt, daß die β-Strahlung des Radiums durch eine Schicht von 0,002 cm Aluminium zur Hälfte absorbiert wird. (S. hierzu den Abschnitt „Radioaktivität").

11. Kolloidchemie (Adsorption). Das Verhalten radioaktiver Stoffe zu Kolloiden hat in mehrfacher Hinsicht ein erhebliches Interesse:

1. Das chemisch-analytische Verhalten der Salze radioaktiver Stoffe in ihren verdünnten Lösungen, welches die Grundlage für die Trennung der radioaktiven Elemente und deren rationeller Anreicherung und Isolierung aus natürlichen Gemischen ist, wird wesentlich beeinflußt durch die gleichzeitige Gegenwart kolloidaler Substanzen.

2. Durch bewußte Anwendung der Adsorptionserscheinungen, unter Verwendung solcher Kolloide, die sich nach stattgefundener Adsorption durch einfache Operationen wieder entfernen lassen (wie z. B. Kieselsäure durch Verflüchtigung als Siliciumfluorid, oder Arsentrisulfid durch Verflüchtigung als Arsentrichlorid, oder Schwefel durch Verbrennung bezw. Verdampfung, Gelatine durch Verbrennung u. a. m.) lassen sich bestimmte radioaktive Stoffe durch „fraktionierte Adsorption" (123) anreichern bezw. isolieren, und zwar in vielen Fällen auf viel rationellere Weise, als nach den zurzeit üblichen Verfahren, die eine Kombination fraktionierter Fällungen und fraktionierter Kristallisationen darstellen. Auch durch Dialyse und Elektrolyse lassen sich die adsorbierten Radiumsalze von den Kolloiden wieder trennen. Dieses letztere Verfahren ist technisch besonders einfach.

3. Die Verteilung der „Radioelemente" in radioaktiven Mineralquellen auf die verschiedenen Quellenbestandteile (Gas, Wasser, Sedimente, Mutterlaugen, Absätze in Quellenspalten usw.) und ebenso die Verteilung der radioaktiven Elemente auf der Erde unter den Sedimentgesteinen wird wesentlich bedingt durch die in der Mehrzahl der Mineralquellen stets enthaltenen anorganischen Kolloide (insbesondere Kieselsäure, Eisen-, Mangan-, Aluminiumhydroxyd, Arsenverbindungen usw.), die auch bei der Bildung der Sedimentgesteine eine Rolle spielen; denn die Sedimentgesteine sind die Produkte der Verwitterung (die eine Hydrolyse der Silikatmoleküle ist) präexistierender Eruptivgesteine

und als deren Hauptprodukt kolloidale Kieselsäure auftritt (124).

In gleicher Weise erklärt die Adsorption der radioaktiven Elemente durch Kolloide die Unterschiede in der Radioaktivität frischer und verwitterter Gesteine.

4. Das außerordentlich wichtige Verhalten in den Organismus gelangender radioaktiver Stoffe — sei es auf natürlichem Wege durch Einatmen oder Trinken radioaktiver Stoffe oder auf künstlichem Wege durch Einspritzen von Radiumlösungen — wird ebenfalls wesentlich bedingt durch das Verhalten der radioaktiven Stoffe zu den im Organismus stets in großer Zahl vorhandenen kolloidalen Substanzen.

Literatur. *1. Spezielle Literatur. 1. Ber. d. deutsch. chem. Ges.* **36** *(1903) 7. — 2. Compt. rend de l'Acad. des sciences.* **145** *(1907) 422. Ber. d. deutsch. chem. Ges.* **41** *(1908) 2. — 3. Compt. rend de l'Acad. des sciences.* **135** *(1902) 161. — 4. Proc. Royal Soc. London.* **80,** *Serie A (1908) 298. Zeitschr. f. anorg. Chemie.* **58** *(1908) 443. — 5. Ber. d. deutsch. chem. Ges.* **42** *(1909) 16. — 6. Ber. d. deutsch. chem. Ges.* **42** *(1909) 16. — 7. Physikal. Zeitschr.* **4** *(1902—3) 285. — 8. Philos. Magazine. [6]* **6** *(1903) 64; [6]* **8** *(1904) 279; (6)* **18** *(1909) 411. — 9. Philos. Magazine. [6]* **6** *(1903) 698. — 10. Physikal. Zeitschr.* **4** *(1902—3) 752. — 11. Physikal. Zeitschr.* **4** *(1902—3) 285. — 12. Zeitschr. f. physikal. Chemie.* **50** *(1904) 100. — 13.* **P. Curie,** *Physik. Zeitschr.* **4** *(1902—3) 456. — 14. Compt. rend. de l'Acad. des sciences.* **150** *(1910) 1740. — 15.* **W. Ramsay und R. W. Gray,** *Compt. rend de l'Acad. des sciences.* **151** *(1910) 126. Ann. Chim. Phys. [8]* **21** *(1910) 145. Zeitschr. f. physikal. Chemie.* **70** *(1910) 116. —* **R. Gray und W. Ramsay,** *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik.* **8** *(1911) 5. Proc. Royal Soc. London. (A)* **84** *(1911) 537. Le Radium.* **8** *(1911) 210. — 16.* **B. B. Boltwood,** *Amer. Journ. Science Silliman. [4]* **25** *(1908) 493. — 17. Le Radium.* **8** *(1911) 256. — Frühere Bestimmungen des Verhältnisses Ur/Ra:* **B. B. Boltwood,** *Amer. Journ. Science.* **18,** *104. Philos. Magazine. (6)* **9** *(1905) 599. —* **R. J. Strutt,** *Proc. Roy. Soc. London.* **76** *(1905) 88. —* **E. Gleditsch,** *Compt. rend de l'Acad. des sciences.* **148,** *1451;* **149** *(1909) 267. — Le Radium.* **6** *(1909) 165. —* **F. Soddy und R. Pirret,** *Philos. Magazine. [6]* **20** *(1910) 345; [6]* **21** *(1911) 652. —* **A. S. Russel,** *Nature.* **84** *(1910) 338. —* **E. Rutherford und B. B. Boltwood,** *Amer. Journ. Science, Silliman. (4)* **20** *(1905) 55. — 18. Le Radium.* **7** *(1910) 299. — 19. Ber. der deutsch. chem. Ges.* **44** *(1911) 771. — Jahrb. d. Radioaktivität und Elektronik.* **8** *(1912) 457. — 20. Ber. d. deutsch. Chem. Ges.* **41** *(1908) 50. — 21. Physik. Zeitschr.* **10** *(1909) 396. — 22.* **H. Rosenbusch,** *Elemente der Gesteinslehre. 3. Aufl. Stuttgart 1910, S. 224. — 23.* **E. Ebler,** *Verhandl. d. deutsch. physikal. Ges.* **11** *(1909) 535. — Zeitschr. f. Balneologie.* **2** *(1909/10) 484. — 24.* **A. Gockel,** *Jahrb. d. Radioaktivität und Elektronik.* **7** *(1910) 487. —* **v. d. Borne,** *Jahrb. d. Radioaktivität und Elektronik.* **2** *(1905) 77.—***Szilard,** *Le Radium.* **6** *(1909) 233. —* **W. Petrascheck,** *Verhandl. d. k. k. geologischen Reichsanstalt in Wien. 1908, No. 16. — 25.* **R. J. Strutt,** *Proc. Royal Soc. London.* **80** *(1908) 572. — Proc. Royal Soc. London.* **76** *(1905) 89;* **77** *(1906) 472;* **78** *(1907) 150 und 166. — 26. Radioactivity and Geology. London 1909. — 26a. Phil. Mag. (6)* **23** *(1912) 201. — 27.* **A. S. Eve und D. McIntosh,** *Philos. Magazine. [6]* **14** *(1907) 231. — 28. Proc. Royal Soc. London.* **78,** *Ser. A (1907) 153. — 29.* **J. Koenigsberger,** *Physikal. Zeitschr.* **7** *(1906) 297. — 30. Philos. Mag. [6]* **16** *(1908) 190. — 30a. Philos Mag. [6]* **23** *(1912) 279. — 31. Philos. Mag. [6[* **15** *(1908) 385. —* **P. Artmann,** *Zeitschr. f. Balneologie. IV (1912) 605. — 32. Philos. Mag. [6]* **18** *102. — 33.* **J. Joly,** *Radioactivity and Geology. London 1909, S. 48. — 34.* **E. Ebler und M. Fellner,** *Zeitschr. f. anorgan. Chemie.* **72** *(1911) 3. — Ber. d. deutsch. chem. Ges.* **44** *(1911) 2332. —* **E. Ebler,** *Verhandl. Deutscher Naturforscher und Ärzte. Karlsruhe 1911. Teil 2, Abt. 5, No. 9 — 35.* **B. Szilard,** *Le Radium.* **7** *(1910) 366. — 36.* **E. Ebler und M. Fellner,** *Zeitschr. f. anorgan. Chemie.* **73** *(1911) 18. —* **I. Elster und H. Geitel,** *Physik. Zeitschr.* **5** *(1904) 11. —* **v. d. Borne,** *Untersuchungen über die Abhängigkeit der Radioaktivität der Bodenluft von geolog. Faktoren. Breslau 1905. —* **F. Henrich,** *Zeitschr. f. Elektrochemie.* **13** *(1907) 400. —* **A. Gockel,** *Jahrb. d. Radioaktivität und Elektronik.* **7** *(1910) 505. — 37. Sitz.-Ber. d. Kais. Akad. d. Wiss. in Wien. Math.-Naturw. Kl. 113, IIa. (1904) 753. — 38. Monatshefte für Chemie.* **26** *(1905) 362. — 39. Zeitschr. f. anorgan. Chemie.* **53** *(1907) 1. — 40. Zeitschr. f. öffentl. Chemie.* **11** *(1905) 271. — 41. Physik. Zeitschr.* **7** *(1906) 209. — 42. Physik. Zeitschr.* **5** *(1904) 323. — 43. Zeitschr. f. anorgan. Chemie.* **72** *(1911) 236. — 44. Jahrb d. Radioaktivität und Elektronik.* **8** *(1911) 23. — 45.* **C. Engler und H. Sieveking,** *Zeitschr. f. anorgan. Chemie.* **53** *(1907) 19. — Zeitschr. f. Elektrochemie.* **11** *(1905) 721. —* **H. Mache,** *Monatshefte f. Chemie.* **26** *(1905) 362. —* **E. Ebler und M. Fellner,** *Zeitschr. f. anorgan. Chemie.* **72** *(1911) 292. — 46.* **Dieselben,** *Zeitschr. f. anorgan. Chemie.* **72** *(1911) 261. — 47. Zeitschr. f. anorgan. Chemie.* **72** *(1911) 178. — 48.* **Becquerel,** *Compt. rend. de l'Acad. des sciences.* **122** *(1896) 1086. — 49. Ann. Chim. Phys. [7]* **30** *(1903) 99, 145, 289. — Compt. rend. de l'Acad. des sciences.* **127** *(1898) 175. — 50. Compt. rend. de l'Acad. des sciences.* **127** *(1898) 1215. — 51.* **H. Geitel,** *Elektrizitätszerstreuung und Radioaktivität. Jahrbuch d. Radioaktivität und Elektronik.* **1** *(1904) 146. — 52.* **S. Curie,** *Thèses présentées à la Faculté des sciences de l'Université de Paris. Paris 1903. —* **L. Haitinger und K. Ulrich,** *I. Mitteilung der Radiumkommission der Kais. Akad. d. Wissensch. in Wien. (1908). — 53.* **H. Souczek,** *V. Mitteilung der Radiumkommission der Kais. Akad. d. Wissensch. in Wien. (1910). — 54.* **K. Aschoff,** *Zeitschr. f. öffentl. Chemie.* **11** *(1905) 271. —* **Neumann,** *Bericht über die Verhandl. des Vereins der Kurorte und Mineralquelleninteressenten. Aachen 1909. S.103. — 55.* **E. Ebler und M. Fellner,** *Ber. d. deutsch. chem. Ges.* **44** *(1911) 2332. —* **E. Ebler,** *D. R. P. No. 243736. — 55a.* **P. Krusch,** *Zeitschr. f. prakt. Geol.* **19** *(1911) 83.—56.* **L. Wickham**

und Dégrais, Radiumtherapie. Deutsche Ausg. von Winkler. Berlin 1910. — 57. **F. Börner und H. Börner,** D. R. P. 77 h. B. 216615. — **E. Ebler,** Franz. Pat. VI, 4, No. 407253. Oesterr. Pat. 77 d. No. 45053. — 58. Compt. rend. de l'Acad. des sciences. **151** (1910) 523. — Chemiker-Zeitung. **34** (1910) 969. — 59. Ber. d. deutschen Chem. Ges. **43** (1910) 2613. — 60. Ber. d. deutsch. chem. Ges. **37** (1904) 811. — 61. Chemiker-Zeitung. **28** (1904) 269. — 62. Ber. d. deutsch. chem. Ges. **37** (1904) 88. — 63. Verhandl. d. deutsch. physik. Ges. **6** (1904) 144. — Annalen der Physik. [4] **20** (1906) 96. — 64. **S. Curie,** Dissertation. Deutsche Ausgabe. Leipzig 1904. S. 36. — **Dieselbe,** Die Radioaktivität. Leipzig 1911. 1. Bd., S. 165. — 65. **E. Gleditsch,** Le Radium. **8** (1911) 257. Ausnahmen bei: **E. Ebler und M. Fellner,** Zeitschr, f. anorgan. Chemie. **72** (1911) 296 und **M. Levin,** Physik. Zeitschr. **11** (1910) 323. — 66. **P. Curie und C. Cheneveau,** Soc. franç. de Physique. 3. 4. 1903. Vergl. auch **St. Meyer,** Wiedemanns Annalen. **69** (1899) 237. — 67. Jahrb. d. Radioaktivität und Elektronik. **3** (1906) 239. — Centralblatt für Mineralogie, Geologie und Paläontologie. Jahrg. 1903, 134. — 68. IV. Mitteilung der Radiumkommission der Kais. Akademie der Wissenschaften in Wien. (1908). — 69. Ber. d. deutsch. chem. Ges. **43** (1910) 2613. — 70. Le Radium. **8** (1911) 299. — 71. **L. Kolowrat,** Le Radium. **6** (1909) 193. — 72. **P. Curie,** Le Radium. **7** (1910) 65. — 73. **R. J. Strutt,** Proc. Royal Soc. London. (A), **76** (1905) 89; **77** (1906) 472; **78** (1907) 150. — **H. W. Schmidt und H. Nick,** Physikal. Zeitschr. **13** (1912) 199. — **J. Joly,** Radioactivity and Geology. London 1909. S. 266. — **E. Ebler und M. Fellner,** Zeitschr. f. anorgan. Chemie. **72** (1911) 258 — 74. **P. Curie,** Le Radium. **7** (1910) 37. — 75. Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik. **7** (1910) 500. — 75a. Le Radium. **7** (1910) 70. — 76. **E. Rutherford,** Radioactivity. Cambridge 1904. S. 326. — 77. **H. W. Schmidt,** Phys. Zeitschr. **6** (1905) 565. — 78. **P. Curie,** Le Radium. **7** (1910) 67. — 79. **Duane und Laborde,** Le Radium. **7** (1910) 162. — 80. **E. Rutherford,** Radiumnormalmasse und deren Verwendung bei radioaktiven Messungen. Leipzig 1911. — 81. Le Radium. **3** (1906) 225. — 82. **E. Ebler,** Ber. d. deutsch. chem. Ges. **43** (1910) 2617. — 83. **E. Rutherford,** Radioaktivität. Deutsche Ausgabe. Berlin 1907. S. 394 u. f. — 84. Compt. rend de l'Acad. des sciences, **136** (1903) 364. — 85. Compt. rend. de l'Acad. des sciences. **140** (1905) 581. — 86. Philos. Mag. [5] **49** (1900) 1 und 161. — 87. Zeitschr. f. Instrum.-Kunde. **24** (1904) 198. — 88. **P. Curie und J. Danne,** Compt. rend. de l'Acad. des sciences. **136** (1903) 364. — **A. Wellik,** Sitz.-Ber. d. Kaiserl. Akademie d. Wissensch. in Wien. Math.-Naturw. Kl. Abt. IIa. **117** (1908) 29. — **E. Ebler und M. Fellner,** Zeitschr. f. anorgan. Chemie. **73** (1911) 17. — 89. **E. Gleditsch,** Le Radium. **8** (1911) 257. — 90. **E. Ebler,** Zeitschr. f. anorgan. Chemie. **72** (1911) 297. — **M. Levin,** Physik. Zeitschr. **11** (1910) 323. — 91. Ber. d. deutsch. chem. Ges. **44** (1911) 772. — 92. **L. Kolowrat,** Le Radium. **7** (1910) 157. — 93. **J. Joly** Philos. Mag. [6] **22** (1911) 134. 94. Dissertation. S. 29. — 95. **F. Giesel,** Radioaktive Substanzen und ihre Strahlen. Stuttgart 1902. S. 8. — 96. Ber. d. deutsch. chem. Ges. **37** (1904) 88. — 97. Ber. d. deutsch. chem. Ges. **37** (1904) 811. — 98. Zeitschr. f. Elektrochemie. **13** (1907) 374. — 99. Zeitschr. f. anorgan. Chemie. **45** (1905) 289. — 100. Zeitschr. f. Elektrochemie. **13** (1907) 375. — 101. Ber. d. deutsch. chem. Ges. **42** (1909) 4088. — 102. Ber. d. deutsch. chem. Ges. **44** (1911) 2332. — Zeitschr. f. anorgan. Chemie. **73** (1911) 1. — Zeitschr. f. Chemie und Industrie d. Kolloide. **9** (1911) 158. — D. R. P. No. 243736. — 103. II. Mitteilung der Radiumkommission d. Kaiserl. Akademie d. Wissensch. in Wien. Wien 1908. „Ueber die Wärmeentwickelung des Radiums." — 104. **E. v. Schweidler und V. F. Hess,** Ebenda S. 2. — 105. Compt. rend de l'Acad. des sciences. **136** (1903) 673. — 106. Ber. d. deutsch. chem. Ges. **38** (1903) 783. — 107. Nature. **68** (1903) 622. — 108. Verhandl. d. deutsch. physikal. Ges. **6** (1904) 101. 109. Ark. f. Math. Astr. och Fys. **1** (1904) 523; **2** (1905) 1. — Physikal. Zeitschr. **6** (1905) 685. — 110. Ann. d. Phys. **21** (1906) 595. — 111. **E. Rutherford,** Radioaktive Umwandlungen. Die Wissenschaft. Bd. 21. Uebersetzt von M. Levin. Braunschweig 1907. S. 213. — 112. Proc. Royal Soc. London. A. **77** (1906) 472; **78** (1907) 150. — 113. Philos. Mag. **12** (1906) 189. — 114. Physikal. Zeitschr. **7** (1906) 297. — 115. Zeitschr. f. Elektrochemie. **13** (1907) 391. — 116. **E. Rutherford und T. Royds,** Jahrb. d. Radioaktivität und Elektronik. **6** (1909) 1. — 117. **F. Giesel,** Ber. d. deutsch. chem. Ges. **36** (1903) 347. — 118. **E. Rutherford,** III. Mitteilung d. Radiumkommission d. Kaiserl. Akademie d. Wissensch. Wien 1908. — **A. Debierne,** Compt. rend. de l'Acad. des sciences. Mai 1904. — 119. **F. Giesel,** Ber. d. deutsch. chem. Ges. **35** (1902) 3608. — Physikal Zeitschr. **3** (1902) 578. — 121. **J. Precht,** Jahrb. d. Radioaktivität und Elektronik. **1** (1904) 61. — 121. Comtp. rend. de l'Acad. des sciences. **127** (1898) 1218; **129** (1899) 116; **131** (1900) 258. — 122. Ann. d. Phys. **10** (1903) 655. — 123. **E. Ebler und M. Fellner,** Ber. d. deutsch. chem. Ges. **44** (1911) 2332. — Zeitschr. f. anorgan. Chemie. **73** (1911) 1. — Zeitschr. f. Chemie u. Industrie d. Kolloide. **9** (1911) 158. — D. R. P. No. 243736. — 124. **H. Rosenbusch,** Elemente d. Gesteinslehre. 3. Aufl. Stuttgart 1910. S. 79 ff. — 2. Allgemeine Literatur. **S. Curie,** Les substances radioactifs. Thèse du doctorat. Paris 1903. — **Dieselbe,** Dasselbe. Deutsch von W. Kaufmann. Leipzig 1904. — **E. Rutherford,** Radioactivity. Cambridge 1904. — **Derselbe,** Dasselbe. Deutsch von E. Aschkinass. Berlin 1907. — **P. Gruner,** Die radioaktiven Substanzen. 2. Aufl., Bern 1911. — **J. Joly,** Radioactivity and Geology. London 1909. — **E. Rutherford,** Radiumnormalmaaße und deren Verwendung bei radioaktiven Messungen. Leipzig 1911. — **P. Curie,** Traité de radioactivité. 2 Vol. Paris 1910. — **Dieselbe,** Dasselbe. Deutsch von B. Finkelstein. Leipzig 1911. — **F. Kohlrausch,** Lehrbuch der praktischen Physik. 11. Aufl. Leipzig und Berlin 1910. — Abschnitt 135. Radioaktivität von E. Dorn. — **R. Biedermann,** Chemiker-Kalender f. 1912, 2. Band

Abschnitt 20. Die radioaktiven Substanzen von E. Ebler. — ***W. Marckwald,*** *Die Radioaktivität. Vortrag gehalten vor der Deutschen Chemischen Gesellschaft. Ber. d. Deutsch. chem. Ges. 41, 1908, S. 1524 bis 1561.* — ***F. Soddy,*** *Die Natur des Radiums. Sechs populäre Experimentalvorlesungen gehalten an der Universität zu Glasgow. Leipzig 1909.*

Erich Ebler.

Berzelius

Jons Jacob.

Geboren am 20. August 1779 in Wäfversunda, gestorben am 7. August 1848 in Stockholm. Ueber seine Lebensverhältnisse vgl. Söderbaum Berzelius' Werden und Wachsen (Leipzig 1899 I. A. Barth). Jacob Berzelius' Selbstbiographische Aufzeichnungen (daselbst 1903). In schwedischer Sprache Reiseaufzeichnungen.

Nach sehr entbehrungsreicher Jugend und mühsam erkämpftem Studium der Medizin und Chemie in Upsala konnte Berzelius diese zunächst nur als Nebenbeschäftigung treiben; erst seit 1807, als Professor der Medizin und Pharmazie in Stockholm, widmete er sich mit ganzer Kraft der Chemie. Mit geringen Mitteln und spärlichen Hilfskräften unternahm er auf breiter Grundlage den Ausbau der seit 1807 allmählich bekannt werdenden Atmotheorie Daltons. Sein großes Verdienst bestand darin, die analytischen Methoden zur Bestimmung der Elemente so ausgearbeitet zu haben, daß eine sichere Ermittelung der relativen Atomgewichte ermöglicht wurde. Unter Benutzung neu hinzukommender Anhaltspunkte — Volumengesetz, Isomorphie, Atomwärme der Elemente, gelang ihm in den folgenden 15 bis 20 Jahren die Aufstellung eines für jene Zeit ausgezeichneten Atomgewichtsystems, das nach mancherlei Erschütterungen erst in neuerer Zeit wieder zu Ehren gekommen ist.

Als Hauptleistungen, zu deren Erreichung seine Ausarbeitung der analytischen Chemie unentbehrlich war, sind zu nennen: Die Aufstellung eines Mineralsystems auf chemischer Grundlage (seit 1812), der Nachweis, daß die organischen Verbindungen nicht besonderen geheimnisvollen Gesetzen, sondern den atomistischen folgen (seit 1814), die Durcharbeitung der elektrochemischen Theorie, die zur Erklärung der rationellen Zusammensetzung der Stoffe dienen sollte, im Zusammenhang damit sein auf dualistischer Grundlage errichtetes Lehrgebäude mit entsprechender Bezeichnungsweise der Verbindungen und mit der seither allgemein angenommenen chemischen Zeichensprache. Außerdem hat er mustergültige Einzeluntersuchungen aus verschiedenen Gebieten der Chemie z. B. über Selen, über Fluor- und Ferricyanverbindungen, über Zusammensetzung seltener Mineralien, über physiologisch wichtige Stoffe ausgeführt und vielfach bahnbrechend gewirkt, so durch die scharfe Erfassung des Begriffes der Isomerie auf organischem Gebiete.

Außer durch seine Experimentaluntersuchungen, die in Poggendorffs und Liebigs Annalen in den Ann. de Chim. et de Phys., sowie den Verhandlungen der schwedischen Akademie erschienen, hat Berzelius ganz außerordentliche Wirkungen als Schriftsteller geübt durch sein Lehrbuch der Chemie, dessen erste Ausgabe schwedisch 1808 bis 1818 erschien (5. Auflage 5 Bde., Deutsch 1843 bis 1848) und durch seine Jahresberichte 1821 bis 1847, in denen er über die Forschungen weiter Gebiete in ausgezeichneter, zum Teil kritischer Weise Bericht erstattete.

Als Meister seines Faches hat Berzelius in seinem höchst bescheiden eingerichteten Laboratorium zahlreiche Schüler, darunter solche, die zu bedeutenden Forschern heranwuchsen, um sich versammelt, zumal in dem dritten Jahrzehnt des vorigen Jahrhunderts, u. a. Fr. Wöhler, E. Mitscherlich, H. Rose, G. Rose, Chr. Gmelin, Magnus, Mosander, Svanberg, Sefström.

E. von Meyer.

Bessel

Friedrich Wilhelm.

Geboren am 22. Juli 1784 zu Minden; gestorben am 17. März 1846 in Königsberg. Er wurde zunächst Kaufmann. Die Vorbereitung für eine Handelsexpedition führte ihn zur Beschäftigung mit Nautik und von da zur Astronomie, der er sich alsdann ganz zuwandte. 1806 wurde Bessel Leiter der Privatsternwarte in Lilienthal, 1810 in Königsberg Direktor der dort zu errichtenden Sternwarte, die er mit vortrefflichen Instrumenten ausrüstete, u. a. einem ganz vorzüglichen Fraunhoferschen Heliometer, womit Bessel Beobachtungen von unübertroffener Schärfe anstellte. In gleichem Maß Praktiker wie Theoretiker, hat Bessel der Astronomie eine Anzahl Beobachtungen und Untersuchungen geliefert, wie auch die Theorie wesentlich gefördert, Gemeinsam mit Neumann unternahm er die Eichung und Kalibrierung der Thermometer; auch gab er eine Theorie des Sekundenpendels.

Literatur. ***Wichmann,*** *Beiträge z. Biograph. B.'s, Peters Zeitschr. f. popul. Mitteil.* — ***Durège,*** *B.'s Leben und Wirken, Zürich 1861.*

E. Drude.

Bestäubung.

1. Bestäubung und Begattung. 2. Die der Bestäubung dienenden Apparate: a) Der den Pollen liefernde Apparat; b) der Pollen aufnehmende Apparat; c) Hilfsorgane und Schutzmittel des Bestäubungsapparates. 3. Die möglichen Arten der Bestäubung. Pollinationstypen. 4. Die Folgen der Bestäubung. 5. Einrichtungen an den Blüten zur Sicherung wirksamer Bestäubung: a) der Selbstbestäubung; b) der Fremdbestäubung. 6. Vollzug der Bestäubung: a) Wasserblütigkeit; b) Windblütigkeit; c) Tierblütigkeit: α) Anlockungsmittel; Schauapparate, Blütenfarben, Blütendüfte; β) Genußmittel, Pollen, Nektar, Nektarien, Ersatz für Nektar. 7. Die Bestäubungsvermittler: a) In-

sekten: Hautflügler, Schmetterlinge, Zweiflügler, Käfer, sonstige; b) Vögel; c) andere Tiere. 8. Die Blumenklassen, Delpinos Einteilung. a) Allotrope Blumen: 1. Klasse Pollenblumen; 2. Klasse Blumen mit allgemein zugänglichem Nektar; 3. Klasse Blumen mit teilweise verborgenem Nektar; b) Hemitrope Blumen: 4. Klasse Blumen mit vollständig geborgenem Nektar; 5. Klasse Blumengesellschaften mit völlig geborgenem Nektar; c) Eutrope Blumen: 6. Klasse Dipterenblumen; 7. Klasse Hymenopterenblumen; 8. Klasse Falterblumen; 9. Klasse Käferblumen; 10. Klasse Dientomogamae; 11. Klasse Vogelblütler.

1. Bestäubung und Begattung. Bestäubung (Pollenübertragung, Pollination) ist die den Blütenpflanzen eigentümliche Form der Begattung, welche darauf beruht, daß zur Herbeiführung der Befruchtung ein am weiblichen Apparat der Blüte entwickeltes Aufnahmeorgan mit Blütenstaub (Pollen) belegt wird.

Ein als Begattung zu bezeichnender, die Befruchtung vorbereitender Akt ist auch bei der Mehrzahl der Sporenpflanzen (Kryptogamen), soweit bei ihnen geschlechtliche Vorgänge stattfinden, zu erkennen. Nur auf den niedersten Stufen dieser fehlt er. So in allen Fällen, bei denen die Gameten, d. h. die zur Vereinigung miteinander zum Zwecke der Erzeugung einer Keimzelle bestimmten kernhaltigen Protoplasten (aus nacktem Protoplasma bestehenden Zellen) nach Struktur und Entstehung voneinander noch nicht verschieden sind und durch den Vorgang der Kopulation miteinander verschmelzen; Näheres hierüber vgl. in dem Artikel „Algen“. Auch bei einer weitergehenden Differenzierung zwischen den beiderlei Gameten, wenn diese als Spermatozoid und Eizelle sich voneinander unterscheiden, kann ihre Verschmelzung ohne vorbereitende Begattung erfolgen, indem das am weiblichen Organ eintreffende Spermatozoid sogleich die Eizelle erreicht und mit ihr verschmilzt (z. B. Vaucheria, Oedogonium, Fucus u. a.). Sobald aber am weiblichen Organ Einrichtungen auftreten, die zum Festhalten der männlichen Gamete dienen und räumlich von der zu befruchtenden Eizelle getrennt sind, kann die Ankunft jener männlichen Gamete an ihnen als Begattung bezeichnet werden; sie wird zweckmäßig von der Befruchtung unterschieden, deren notwendige Voraussetzung sie ist, die aber nicht immer durch sie hervorgerufen werden muß. Als Beispiele für Begattungsorgane der Sporenpflanzen sei die Trichogyne der Florideen und der Archegonienhals bei Moosen und Pteridophyten angeführt. Bei der Trichoygnbegattung haften die nicht aktiv beweglichen männlichen Gameten (Spermatien), die von den Strömungen des Wassers transportiert werden müssen, an dem meist haar- oder keulenförmigen Fortsatz, den das obere Ende des weiblichen Apparates (Karpogon) entwickelt hat, verwachsen mit ihm und lassen nach Auflösung der trennenden Zellhautstücke ihren Kern in diesen Fortsatz, eben die Trichogyne, eintreten, von wo er nach abwärts wandert, um am Grunde des Karpogons mit dem Eikern zu verschmelzen. Bei typischer Archegonbegattung hat die männliche Gamete die Form eines Spermatozoides, welches im Wasser mit eigener Bewegung sich zum weiblichen Organ hinbegibt. Dieses, das Archegonium, geht in einen zelligen einschichtigen Hals aus, der anfänglich an der Spitze geschlossen und in seinem Innern von einer Reihe von Zellen (Halskanalzellen) ausgefüllt ist; sie finden im Bauche des Archegons ihre Fortsetzung in der Bauchkanalzelle und der unter ihr stehenden größeren Eizelle. Bei völliger Geschlechtsreife öffnet sich der Hals an seiner Spitze durch Auseinanderweichen der dort befindlichen Zellen, die Reihe der Halskanalzellen und die Bauchkanalzelle lösen sich in eine schleimige Substanz auf, so daß im Hals ein kanalartiger Zugang zu der jetzt freigelegten Eizelle entsteht. Die Begattung erfolgt mit dem Eintreffen von Spermatozoiden an der Spitze des geöffneten Archegoniumhalses, und hierhin begeben sie sich angezogen durch Stoffe, die in dem hier hervortretenden Schleim enthalten sind (durch Chemotaxis). Als spezifisches Anlockungsmittel für die Spermatozoiden der Farne, Schachtelhalme, Salvinia, Isoëtes und Selaginella ist Apfelsäure in niederen Konzentrationen, am wirksamsten in 0,01- bis 0,1prozentiger Lösung, nachgewiesen worden; für die Spermatozoiden von Lycopodium ist es Zitronensäure, während für die von Laubmoosen Rohrzucker, für die von Lebermoosen (Marchantia) Proteïnstoffe die gleiche Rolle spielen. Sie leiten die in den Hals der Archegonien eingedrungenen Spermatozoiden bis zur Eizelle.

Während bei den Sporenpflanzen nicht nur die Befruchtung, sondern auch die Begattung von der Anwesenheit tropfbar flüssigen Wassers abhängig ist, in dem beiderlei oder wenigstens die männlichen Gameten sich bewegen müssen, setzt bei den Blütenpflanzen, deren Geschlechtsorgane sich fast ohne Ausnahme an der Luft entfalten, die Begattung einen Transport der männlichen Zellen, die nachher die männlichen Gameten liefern, durch die Luft voraus und dementsprechend sind hier die Bestäubungsorgane eingerichtet.

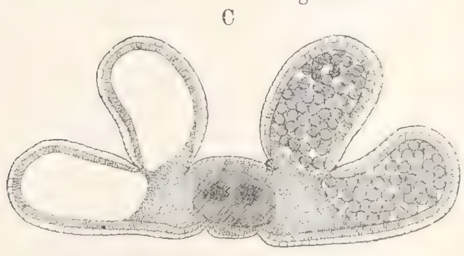
2. Die der Bestäubung dienenden Apparate. Sie finden sich bei allen Blütenpflanzen zusammengeordnet zur Blüte (vgl. den Artikel „Blüte“).

2a) Der den Pollen liefernde Apparat ist das Androeceum, welches in der einzelnen Blüte aus seiner verschieden großen Zahl von Staubblättern besteht. Diese tragen als ihren wichtigsten Bestandteil die Pollensäcke, in deren Innerem der Pollen sich ausbildet, und die bei vielen nacktsamigen und allen bedecktsamigen Pflanzen zum Staubbeutel (Anthere) verwachsen sind (Fig. 1). Der Pollen stellt in den typischen Fällen eine lockere, staubige oder leicht zusammenhaftende mehlige Masse dar, die sich aus kleinen Körnern, den Pollenkörnern (Fig. 2), zusammensetzt. Entstehungsweise

und Struktur der Pollenkörner lassen keinen Zweifel darüber, daß sie den Mikrosporen der verschiedensporigen Gefäßkryptogamen homolog sind; deshalb legt man ihnen am zweckmäßigsten auch denselben Namen bei und bezeichnet die Pollensäcke auch als Mikrosporangien, wie bei den genannten Kryptogamen. So wie deren Mikrosporen bei ihrer Keimung einen männlichen Vorkeim aus sich hervorgehen lassen, der im Laufe der stammesgeschichtlichen Weiterentwicke-



Fig. 1. Bau der Anthere. A Anthere von Ficaria verna vor dem Aufspringen. 8 fach vergrößert. B Dieselbe mit geöffneten Fächern. 8 fach vergrößert. C Querschnitt einer Anthere von Cobaea scandens, die beiden rechten Fächer mit Pollen, die beiden linken leer. 15 fach vergrößert.



lung immer mehr von der Mikrospore abhängig und endlich so wenigzellig wird, daß er außer dem Antheridium mit den Spermatozoiden nur noch aus einigen vegetativen Zellen besteht, so zeigen die Pollenkörner im Zustande ihrer fertigen Ausbildung trotz noch fortgeschrittener Rückbildung deutliche Anklänge an einen männlichen Vorkeim: bei den niedersten Blütenpflanzen bestehen sie neben einigen vegetativen aus einer verhältnismäßig großen Zelle, die später die männlichen Gameten, und zwar bei den Cycadeen und der Coniferengattung Ginkgo sogar noch in der Form von Spermatozoiden liefert; weiterhin treten an die Stelle der Spermatozoiden die einer eigenen Bewegung unfähigen Spermazellen, die Anzahl der vegetativen Zellen des Pollenkornes vermindert sich, ihre Abgrenzung gegeneinander und gegen die Gameten liefernde Zelle wird undeutlich und endlich bei den die große Masse aller Blütenpflanzen bildenden Angiospermen ist als letzter Rest des ursprünglichen männlichen Vorkeimes nur noch die Ausstattung des Pollenkorninhaltes mit zwei Kernen übrig geblieben, von denen der eine (generative) später zwei männliche Gameten liefert, während der andere (vegetative) funktionslos zugrunde geht (Fig. 2A). Diese Kerne besitzen haploide Chromosomen, wie auch die Kerne aller anderen Zellen des männlichen Gametophyten, dessen Existenz mit der unter einer Reduktionsteilung der Zellkerne vor sich gehenden Entstehung der Pollenmutterzellen beginnt und mit dem Uebertritt der männlichen zur weiblichen Gamete, also mit dem Befruchtungsakt endet.

Der zunächst im Inneren der Antherenfächer (Pollensäcke, Mikrosporangien) eingeschlossene Pollen muß, wenn er einer Bestäubung dienen soll, freigelegt werden. Dies geschieht chasmanther, d. h. durch Aufspringen der Wandung jener Fächer, die durch ihren anatomischen Bau dazu vorbereitet ist, indem sie in der Regel in der inneren, unter der Epidermis liegenden Schicht ihrer zweischichtigen Wand faserige

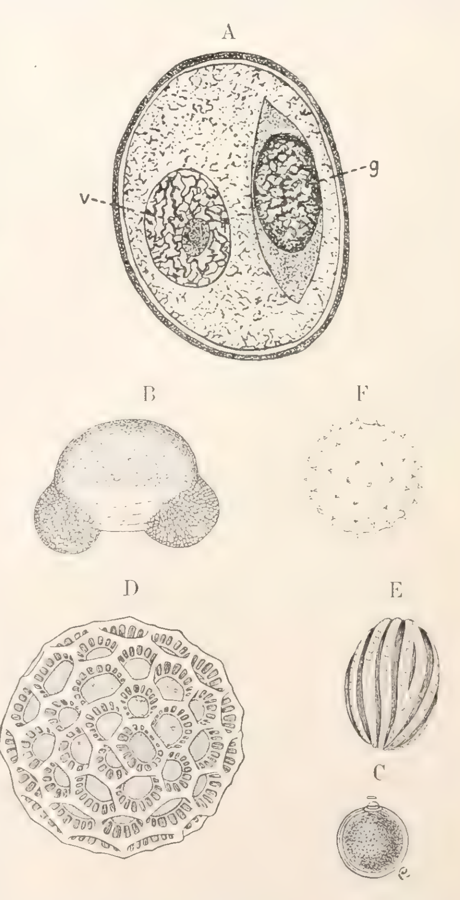


Fig. 2. Bau der Pollenkörner. A Pollenkorn von Lilium martagon im Durchschnitt, die vegetative (v) und die generative Zelle (g) zeigend. 750 fach vergrößert. B Pollenkorn von Abies pectinata, C von Bromus inermis, D von Cobaea scandens, E von Strobilanthes Deyerianus, F von Abutilon Darwini. 200 fach vergrößert.

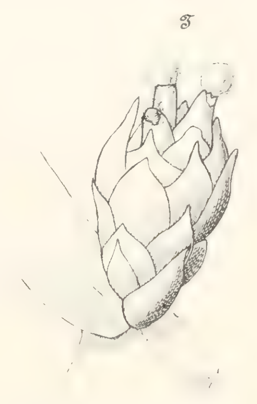
Verdickungen zeigt (Fig. 1C), die beim Austrocknen der Anthere der Zusammenziehung größeren Widerstand leisten als die nicht verdickten Zellen und ein Zerreißen der Antherenwand, oft zugleich eine Umstülpung ihrer ursprünglichen Innenseite nach außen herbeiführen. Die Anordnung der mechanisch verstärkten Zellen in der Antherenwand bedingt es, ob das Aufspringen durch Längsrisse, Klappen, Löcher usw. erfolgt. Die physikalischen Eigenschaften des aus den Antheren frei gewordenen Pollens hängen von der Struktur der einzelnen Pollenkörner und von ihrer loseren oder festeren Verbindung untereinander ab. Ein Pollenkorn, fast immer von mikroskopischer Kleinheit, stellt eine Zelle von meist rundlicher, eiförmiger oder eckiger Gestalt und häufig gelber, doch auch anderer Farbe dar, deren Inhalt stark ausgetrocknet ist und deren Wandung infolgedessen nicht selten Einfaltungen zeigt. Diese Wand besteht aus zwei dicht übereinander liegenden Schichten, die als Außenhaut (Exine) und Innenhaut (Intine) bezeichnet werden; letztere ist zart und geschmeidig, vorzugsweise aus Cellulose gebildet, die Außenhaut kräftiger und spröder, stark kutikularisiert und oft gefärbt. Sie pflegt dünne Stellen oder Lücken aufzuweisen, die Keimporen, Stellen, die das spätere Hervortreten des von der wachsenden Innenhaut begrenzten Pollenschlauches gestatten. Im übrigen ist die Außenfläche der Exine (Fig. 2 B bis F) entweder glatt, und dann nimmt der Pollen, wenn seine Körner nicht etwa durch dazwischen gelagerte Substanzen verklebt oder miteinander verwachsen sind, die Beschaffenheit eines lockeren mehligen Pulvers an; oder sie ist mit regelmäßig angeordneten, mehr oder weniger weit vorspringenden Unebenheiten, wie Wärzchen, Stacheln, Leisten, Kämmen u. ä. besetzt. Die hierdurch hervorgerufene Rauheit bedingt ein gewisses Zusammenhängen der Pollenkörner aneinander und Anhaften auf den geöffneten Antherenfächern; noch mehr wird dies begünstigt durch Ausbildung von klebrigen Massen zwischen den Pollenkörnern aus den Bestandteilen der bei der Entstehung der Pollenkörner sich teilweise auflösenden Pollenmutterzellen. So findet man die Pollenzellen oft durch Oeltröpfchen locker miteinander verbunden, selten durch dünne ausziehbare Fäden verklebt. In einigen Pflanzenfamilien sind immer je vier Pollenkörner miteinander (zu Pollen-Tetraden) verwachsen, in anderen alle Körner eines Antherenfaches zu kolbigen oder plättchenartigen Massen (Pollinien) fest verbunden (Sympollinismus). Der Inhalt des Pollenkornes wird aus wasserarmem Protoplasma gebildet, in dem außer den oben erwähnten zwei Zellkernen auch Reservestoffe in gelöster oder fester Form enthalten sind.

Hinsichtlich der chemischen Zusammensetzung des Pollens ist in ihm ein geringer Aschengehalt nachgewiesen, der zwischen 3 bis 9% der Trockensubstanz schwankt; in der Asche ist viel Phosphorsäure, Kali und Magnesia, aber wenig Kalk enthalten. Sonst fanden sich 16 bis 30% Eiweißkörper, 1 bis 7% Stärke, 0 bis 15% Zucker, 3 bis 10% Fett in verschiedenen Pollensorten vor.

2b) Der Pollen aufnehmende Apparat in der Blüte ist bei den Gymnospermen die Mikropyle der frei an der Außenluft stehenden Samenanlage, bei den Angiospermen die einen Bestandteil des Pistilles bildende Narbe.

Die Mikropyle der gymnospermischen Samenanlagen (Fig. 3) ist halsartig vorgezogen oder schlauchartig verlängert und wird

Fig. 3. Weibliche Blüte von Juniperus communis mit 3 Samenanlagen, die je ein Mikropylentröpfchen T absondern. 15 fach vergrößert.



zum Auffangen und Festhalten von Pollenkörnern dadurch geschickt, daß sie zur Zeit der Empfängnisfähigkeit aus ihrer Oeffnung ein Tröpfchen (Bestäubungstropfen) aussondert, welches gewöhnlich aus einer wässerigen Flüssigkeit von schwach saurer Reaktion besteht, bei den Gattungen Ephedra und Welwitschia aber so zuckerhaltig ist, daß man es als Nektartröpfchen bezeichnen darf. Durch Einziehen dieses Tröpfchens in die Mikropyle gelangen die in ihm schwimmenden Pollenkörner in die oberhalb des Nucellus ausgebildete Pollenkammer, wo sie keimen.

Bei den Angiospermen, deren Samenanlagen im Fruchtknoten eingeschlossen sind, entwickelt das Pistill ein besonderes Organ für die Aufnahme dss Pollens, nämlich die Narbe (Stigma). Sie steht in der Regel am Gipfel des Pistilles, oft am Ende eines Griffels (Stylus) und hält auf sie übertragene Pollenkörner entweder dadurch fest, daß sie sie mit einer großen haarigen oder federig

zerteilten Oberfläche zwischen zackigen oder borstigen Zellen auffängt (Fig. 4A), oder sie scheidet noch häufiger eine klebrige Flüssigkeit (Narbenflüssigkeit) aus, auf der die Pollenkörner haften bleiben. Diese Flüssigkeit entsteht durch eine Ausscheidung der die Narbenoberfläche überziehenden Papillen (Fig. 4B), durch Verschleimung ihrer Wandungen oder durch leichte Zerreiblichkeit der Papillen, wodurch sie in eine ölige Masse umgewandelt werden; sie dient nicht nur zur Festhaltung von auf die Narbe gelangten Pollenkörnern, sondern liefert diesen auch die nötige Flüssigkeit zum Aufquellen und zum ersten Auskeimen des Pollenschlauches, der die Narbe und das an sie anschließende, den Griffel durchziehende „leitende Gewebe" durchwachsen muß, um endlich mit seinem die Spermakerne enthaltenden Ende

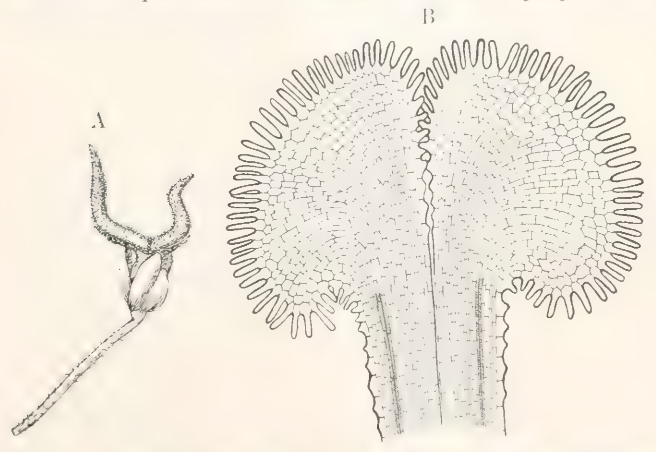


Fig. 4. Struktur der Narbe. A Narben einer windblütigen Pflanze, Celtis australis, im weiblichen Zustand der Zwitterblüte; 3 fach vergrößert. B Längsschnitt durch die Narbe einer insektenblütigen Pflanze, Primula acaulis. 40 fach vergrößert.

im Innern des Fruchtknotens und bei den dort befindlichen Samenanlagen anzukommen und deren im Embryosack liegende Eizelle zu befruchten. Der Kern der Eizelle, die mit ihren Schwesterzellen und dem übrigen Inhalt des Embryosackes den weiblichen Gametophyten der Blütenpflanzen darstellt, ist ebenso wie der Kern der männlichen Gamete, infolge der bei der Entstehung der Embryosackmutterzelle eingetretenen Reduktionsteilung, haploid. Weiteres über diese Verhältnisse s. in dem Artikel „Befruchtung".

2c) Hilfsorgane und Schutzmittel des Bestäubungsapparates. Nur verhältnismäßig selten besteht die Blüte lediglich aus Geschlechtsorganen, sehr allgemein werden diese von Blütenhüllen umgeben, denen zunächst die Funktion zufällt, im Knospenzustand die zarten Bestäubungsorgane einzuschließen und vor ungünstigen äußeren Einwirkungen, wie niedere Temperatur, starke Verdunstung und Beschädigung durch Tiere, zu schützen; bei nackten Blüten pflegt dieser Knospenschutz durch Tragblätter der Blüten oder Blütenstände übernommen zu werden. Nach Aufgehen der Blütenknospen nehmen die Blütenhüllblätter eine Lage und Stellung ein, die für den Eintritt der Bestäubung vorteilhaft oder wenigstens nicht hinderlich ist, und oft schützen sie durch ihre Anordnung, Gestalt, Behaarung oder sonstige Ausrüstung die Bestäubungsorgane vor Regen und unnützen Besuchern (vgl. hierzu auch den Artikel „Schutzmittel"). Die einmal erschlossene Blüte bleibt entweder bis zum Verblühen geöffnet, so daß während dieser Zeit die Bestäubungsorgane ununterbrochen zugänglich und äußeren Einflüssen ausgesetzt sind, oder sie besitzt die Fähigkeit, sich wiederholt zu öffnen und zu schließen. Im letzteren Falle erfolgt das Schließen im allgemeinen bei Nacht und bei kühler oder regnerischer Witterung und stellt offenbar ein Schutzmittel der Blüten gegen zu große Abkühlung und Wetterungunst dar. Die Dauer, während welcher eine Blüte ununterbrochen oder unter periodischem Auf- und Zugehen geöffnet bleibt, zeigt bei den verschiedenen Arten sehr große Verschiedenheiten und kann von wenigen Minuten (bei manchen Gräsern) bis zu vielen Tagen und selbst Wochen schwanken. Verlängert wird sehr allgemein die Blütendauer durch kühles Wetter und durch längeres Ausbleiben der Bestäubung, deren rascher Eintritt im Gegenteil auch ein schnelles Abblühen zur Folge hat. Ueber Blüten, welche sich nie öffnen vgl. unter 5a; über die als Hilfsorgane sehr häufig ausgebildeten Nektarien unter 6cβ.

3. Die möglichen Arten der Bestäubung. Pollinationstypen. Durch die mit dem Oeffnen der Blüte eintretende Freilegung der Bestäubungsorgane ist nicht nur die auf die Zwitterblüten beschränkte Möglichkeit der Belegung der Narbe mit Pollen gegeben, der aus den Antheren derselben Blüte stammt, sondern es können auf sie auch allerhand Pollenkörner übertragen werden, die von anderen in der Nachbarschaft vorhandenen Blüten derselben Pflanze oder auch anderer Pflanzen der gleichen oder einer anderen Species herkommen. Es ist

ferner die Möglichkeit vorhanden, daß (nur in einer Zwitterblüte) ganz von selbst der aus der Anthere befreite Pollen auf die Narbe derselben Blüte fällt, oder daß durch irgendwelche fremde äußere Agentien die Belegung einer Narbe (bezw. Mikropyle) mit Pollen besorgt wird, der aus derselben oder einer anderen Blüte abstammen kann. Den ersten Fall bezeichnete Vaucher als innere, den zweiten als äußere Befruchtung (bezw. Bestäubung), und Delpino nannte alle Pflanzen, bei denen die Uebertragung der männlichen Zellen auf das weibliche Organ einer Vermittelung durch äußere Kräfte bedarf, Diamesogamen. Eingehender ist folgende Uebersicht über die möglichen und in Wirklichkeit vorkommenden Arten, wie die Bestäubung vollzogen werden kann.

Pollinationstypen. A. Selbstbestäubung (Autogamie, direkte, homokline Bestäubung). Die Narbe wird mit Pollen belegt, der aus derselben (zuständigen) Blüte stammt, welcher auch das weibliche Organ angehört. Selbstbestäubung kann ohne fremde Einwirkung eintreten und wird dann als spontane bezeichnet, oder sie kann durch äußere Einwirkung vermittelt werden. Je nach der Struktur der Blüten ist sie möglich oder unmöglich, unvermeidlich, begünstigt, erschwert oder verhindert. Zwangsbestäubung nennt man die in geschlossen bleibenden Blüten unvermeidlich eintretende spontane Autogamie; als Afterbefruchtung bezeichnete Gärtner eine von dem Beobachter nicht bemerkte Selbstbestäubung.

B. Fremdbestäubung (Allogamie, indirekte, heterokline Bestäubung). Der zur Bestäubung dienende Pollen gehört einer anderen Blüte an als das bestäubte weibliche Organ. Fremdbestäubung kann in der Regel nur durch äußere Hilfe vermittelt werden und ähnlich wie die Selbstbestäubung im einzelnen Falle möglich oder unmöglich, notwendig, begünstigt, erschwert oder verhindert sein. Gehören die bei der Bestäubung miteinander verbundenen Geschlechtsorgane Blüten derselben Species an, so nennt man die Bestäubung einartig, in anderen Fällen artfremd. Nach dem Verwandtschaftsgrade zwischen der im Pollenkorn entwickelten männlichen und der im Embryosack enthaltenen weiblichen Gamete, deren Verschmelzung durch die Bestäubung vorbereitet wird, lassen sich folgende Formen der Fremdbestäubung unterscheiden.

1. Nachbarbestäubung (Geitonogamie); die Gameten sind in verschiedenen Blüten desselben Pflanzenindividuums entstanden.

2. Geschwisterbestäubung (Adelphogamie); die Gameten stammen von verschiedenen Individuen derselben Art ab, die aber sich vegetativ von der gleichen Mutterpflanze herleiten, also nahe miteinander verwandt sind.

3. Kreuzbestäubung (Xenogamie. Gnesiogamie, Staurogamie); die Gameten stammen von verschiedenen, nicht näher miteinander verwandten Individuen derselben Species und Varietät ab.

4. Blendlingsbestäubung (Nothogamie); die Gameten stammen von zwei verschiedenen Varietäten derselben Species ab.

5. Bastardbestäubung (Hybridogamie); die Gameten stammen von zwei verschiedenen Arten ab.

Als Endogamie (autogenetische Bestäubung, Inzucht) faßt man die Selbstbestäubung, Nachbar- und Geschwisterbestäubung zusammen, die miteinander die nahe Verwandtschaft der beiderlei Gameten und namentlich ihrer Kerne gemeinsam haben; Exogamie (heterogenetische Bestäubung) nennt man gemeinsam die Kreuz-, Blendlings- und Bastardbestäubung, bei denen die beiderseitigen Gameten nicht miteinander verwandt sind. Amphigam sind solche Pflanzen, die sich je nach Umständen bald auf exogamem, bald auf endogamem Wege fortpflanzen. Unter Doppelbestäubung (gemischter Bestäubung) versteht man die Belegung einer Narbe mit zweierlei Pollensorten.

4. Die Folgen der Bestäubung machen sich im allgemeinen an allen Teilen der Blüte geltend, welche in den Zustand der Nachblüte (Postfloration) eintritt. Dabei welken und vertrocknen die Blütenorgane, deren Verrichtung mit dem Eintritt der Bestäubung beendet ist, und fallen häufig ab; so in der Regel die Staubblätter und vom Gynaeceum die Griffel und Narben. Die Dauer der Blütenhüllen, denen oft noch die Rolle eines Schutzorganes für die sich entwickelnde Frucht zufällt, kann sehr verschieden sein, und sie können nach der Bestäubung noch wachsen und (karpotropische) Bewegungen ausführen. Diese Postflorationserscheinungen werden teils durch den auf die Narbe gelangenden Pollen, und zwar bei den Orchideen durch einen den Pollenkörnern äußerlich anhaftenden Reizstoff, teils durch die auswachsenden Pollenschläuche induziert. Auch andere Blütenorgane, wie die Blütenachse, ferner Hochblätter, Blütenstandsachsen und Blütenstiele können während der Nachblüte bestimmten Veränderungen unterliegen, Bewegungen ausführen usw.

Die wichtigsten Veränderungen, welche infolge der Bestäubung an den Blüten eintreten, betreffen aber den Fruchtknoten und die Samenanlagen, an deren Eizelle die Befruchtung stattfindet, welche als die normale Folge der Bestäubung zu

bezeichnen ist. Sie führt zur Ausbildung eines Embryos aus der befruchteten Eizelle, eines Samens aus der Samenanlage, einer Frucht aus dem Gynaeceum der Blüte, und die Folgen einer unvollkommenen Befruchtung machen sich an diesen Organen in der Regel in der angeführten Reihenfolge geltend. Die größere oder geringere Wirksamkeit der Bestäubung hinsichtlich der Befruchtung hängt bei normaler Beschaffenheit der weiblichen Organe von der Natur des die Bestäubung veranlassenden Pollens ab: die Belegung einer Narbe mit zu wenig Pollenkörnern kann das Ausbleiben der Befruchtung an einer Anzahl von Samenanlagen zur Folge haben, alter Pollen zur Produktion von Pollenschläuchen unfähig sein, vor allem aber hängt der Erfolg davon ab, in welchem Verwandtschaftsgrad der durch das Pollenkorn repräsentierte männliche Gamet zu dem zu befruchtenden weiblichen steht. Somit sind im besonderen die Folgen der unter 3 aufgeführten Bestäubungsarten sehr abweichend untereinander.

1. Selbstbestäubung hat nicht selten normale Frucht- und Samenbildung zur Folge; man bezeichnet diese Erscheinung als Selbstbefruchtung (Autokarpie) und die Pflanzen, die ein solches Verhalten zeigen, als selbstfertil. In zahlreichen Fällen hat man aber verminderte Fruchtbarkeit als Folge von Selbstbestäubung festgestellt, die bei verschiedenen Pflanzen in allmählichen Abstufungen bis zu völliger Unfruchtbarkeit führen kann; dann spricht man von teilweiser oder völliger Selbststerilität.

2. Fremdbestäubung kann, sofern sie endogam ist, in ihren Folgen ganz mit der Selbstbestäubung übereinstimmen, also volle oder verminderte Fruchtbarkeit oder auch Unfruchtbarkeit nach sich ziehen; führt sie zur Fruchtbarkeit, so nennt man den Vorgang Allokarpie im allgemeinen, mit den auf Nachbar- und Geschwisterbestäubung zurückgehenden Formen der Geitono- und Adelphokarpie. Von den exogamen Fremdbestäubungen ist nach allen vorliegenden Erfahrungen die Kreuzbestäubung diejenige, welche bezüglich der Hervorbringung von Samen und Früchten unter allen Bestäubungsarten die besten Ergebnisse liefert, also zu einer vollkommenen Kreuzbefruchtung (Xenokarpie) führt. Blendlingsbestäubung veranlaßt in der Regel gute Ausbildung von Samen und Früchten (Nothokarpie), Bastardbestäubung dagegen nur, wenn die miteinander verbundenen Arten in einer näheren Verwandtschaft stehen, z. B. Gattungsgenossen sind; in solchen Fällen tritt Bastardierung (Hybridokarpie) ein.

Unwirksamkeit der Bestäubung wird demnach besonders bei zu naher und bei zu geringer Verwandtschaft der beiderlei Gameten beobachtet, und wenn sie für die letzteren Fälle wohl schließlich auf eine Strukturverschiedenheit der Gametenkerne, die eine Vereinigung ihrer Chromosomen nicht gestattet, zurückzuführen ist, so unterbleibt doch auch nicht selten bereits die Keimung der Pollenkörner auf der Narbe, oder ihre Pollenschläuche wachsen nicht bis zu den Samenanlagen. Als Ursache der Selbststerilität ließ sich in einzelnen Fällen ebenfalls zu schwaches Wachstum der Pollenschläuche, in anderen Unterbleiben der Keimung der Pollenkörner auf der Narbe, weil diese erst durch Insektenbesuch für diese Keimung geeignet gemacht wird, nachweisen; andere mögliche Ursachen, wie Versagen der Zuleitung der Pollenschläuche zu den Samenanlagen, Ungeeignetheit der Sexualzellen zur Verschmelzung, geringe Entwickelungsfähigkeit des Produktes ihrer Verschmelzung, sind noch nicht experimentell geprüft worden. Diese Verhältnisse machen es verständlich, daß bei Doppelbestäubungen, wie sie in freier Natur sehr oft vorkommen, und gegen die an den Blüten keine Schutzmittel ausgebildet sind, im allgemeinen einartige Bestäubung über artfremde, allogame über autogame, xenogame über endogame Bestäubung die Oberhand gewinnt, artfremde Bestäubung gewöhnlich einflußlos ist und die normale Befruchtung nicht hindert.

Aus diesem Abschnitt ergibt sich, daß zum Eintritt einer vollkommenen Befruchtung nicht nur Bestäubung schlechthin, auch nicht unbedingt jede einartige Bestäubung erforderlich ist, sondern die Belegung der Narbe mit Pollen von einer ganz bestimmten Herkunft, die nicht in allen Einzelfällen die gleiche sein braucht. Man kann denjenigen Pollen, der bei jeder Pflanzenart die beste Einwirkung auf die Ausbildung von Samen und Früchten äußert, den legitimen Pollen nennen. Es handelt sich nun in den Blüten sehr häufig nicht nur darum, womöglich die wirksamste Bestäubungsart herbeizuführen, sondern auch andere, weniger wirksame, aber vielleicht einfacher zu erreichende Bestäubungsmöglichkeiten nicht aufzugeben; deswegen finden wir in reichster und mannigfaltigster Ausbildung neben Einrichtungen zur Sicherung der Allogamie auch solche zur Herbeiführung der Autogamie, von denen bei einer bestimmten Pflanzenart bald die eine, bald die andere zu Uebergewicht und Vorherrschaft gelangen kann.

5. Einrichtungen an den Blüten zur Sicherung wirksamer Bestäubung.

5a) Einrichtungen zur Sicherung

der Selbstbestäubung. 1. Die bei den Blüten in durchaus überwiegendem Maße vorkommende Zwitterigkeit (Hermaphroditismus, Androgynie, Monoklinie), d. h. das Nebeneinanderstehen männlicher und weiblicher Organe in derselben Blüte begünstigt wegen der geringen räumlichen Entfernung zwischen Antheren und Narben deren Belegung mit Pollen derselben Blüte.

2. Sie wird in Zwitterblüten nicht selten in noch höherem Grade gesichert oder selbst unvermeidlich, wenn die belegungsfähige Narbe und der freigewordene Pollen einander unmittelbar berühren.

3. Wachstumsbewegungen der Staubblätter bringen die geöffneten und mit Pollen bedeckten Antheren in Berührung mit der empfängnisfähigen Narbe. Dies geschieht durch Verlängerung der Staubfäden, die anfänglich kürzer waren als das Pistill, durch Herüberneigen oder durch Biegungen der Staubblätter gegen die Narbe.

4. Wachstumsbewegungen und Gestaltveränderungen der Griffel und Narben führen nicht selten dazu, die Narben mit dem an seiner Stelle liegen bleibenden Pollen in Berührung zu bringen, nämlich Verlängerung oder Verkürzung, Neigungen, Biegungen und Einrollungen des Griffels, sowie Biegungen und Rollungen der Narbenäste (z. B. bei Campanulaceen und Compositen).

5. Stellung der empfängnisfähigen Narbe unterhalb der Antheren, so daß abbröckelnder oder mehliger Pollen, der von selbst aus den Antheren herausfällt, die Narbe trifft. Mitunter wird durch Biegungen des Blütenstieles oder der Geschlechtsorgane eine solche gegenseitige Stellung der Bestäubungsorgane erst im Verlaufe des Blühens herbeigeführt.

6. Bewegungen der Blütenhüllblätter durch Wachstum während des Blühens, beim Oeffnen und Schließen der Blüten oder beim Verblühen führen dazu, entweder die geöffneten Antheren oder in der Blüte an bestimmten Stellen abgelagerten Pollen an die Narben anzudrücken.

7. Zwitterblüten, welche immer geschlossen bleiben, gestatten fast in allen Fällen, bei den einheimischen Pflanzen ausnahmslos, nur den Eintritt spontaner Selbstbestäubung unter Ausschluß von Fremdbestäubung. Sie werden kleistogam genannt, während als kleistopetal solche Blüten (nur in der Familie der Bromeliaceen bekannt) von ihnen unterschieden werden, die sich auch niemals öffnen, aber dennoch Einrichtungen zum Vollzug von Fremdbestäubung besitzen. Kleistogamie findet sich nicht eben selten in sehr verschiedenen, untereinander in keinem näheren Verwandtschaftsverhältnis stehenden Familien bald regelmäßig, bald mehr nebensächlich, teils als habituelle erbliche, von äußeren Einflüssen unabhängige Erscheinung, teils als Folge äußerer Einwirkungen. Bei habitueller Kleistogamie (Fig. 5) sind die Blütenorgane infolge einer Entwickelungshemmung nach Größe und oft auch ihrer Zahl nach erheblich reduziert; man spricht dann von echter oder Archikleistogamie. Dabei tritt eine echte Zwangsbestäubung ein, entweder mit Aufspringen der an der Narbe unmittelbar anliegenden Antheren verbunden, oder unter



Fig. 5. Kleistogame Blüte von Lamium amplexicaule im Längsschnitt, 8fach vergrößert.

Durchwachsen der Pollenschläuche durch die geschlossen bleibende Antherenwand (Kleistantherie). Als doppelte Kleistogamie hat man den bei einigen Gräsern beobachteten Vorgang bezeichnet, daß aus kleistogamisch blühenden Aehrchen zusammengesetzte Blütenstände ihrerseits noch in einer Blattscheide eingeschlossen bleiben. Kleistogame Blüten, in denen die Bestäubungsorgane keine oder keine erhebliche Reduktion erfahren haben, nennt man pseudokleistogam, und in ihnen findet eine unechte Zwangsbestäubung statt; auch ihre Kleistogamie kann habituell sein, außerdem gehören zu ihnen die Hydrokleistogamen, bei denen die Kleistogamie infolge der Ueberflutung der Blüte mit Wasser hervorgerufen wird, die Photokleistogamen, wo sie durch Lichtmangel, die Xerokleistogamen, wo sie durch zu geringe Wasserzufuhr, und die Thermokleistogamen, wo sie durch zu niedere Temperatur verursacht wird. Unter Hemikleistogamie versteht man gewisse Uebergänge zwischen kleistogamen und offenen Blüten.

Kleistogame Blüten pflegen von voller Fruchtbarkeit zu sein. Nur in sehr seltenen Fällen besitzt eine Pflanzenart ausschließlich kleistogame Blüten, fast immer bringt sie neben solchen auch noch offen blühende hervor.

8. Als Knospenbefruchtung bezeichnet man den bei einigen Orchideen beobachteten Vorgang, daß die Bestäubung schon vor dem Aufgehen der Blüte eintritt, die sich im übrigen später in normaler Weise öffnet.

9. Die Homogamie, d. h. die gleichzeitige Geschlechtsreife der männlichen und der weib-

lichen Organe innerhalb derselben Zwitterblüte, kann je nach dem sonstigen Bau der Blüte nicht nur Autogamie, sondern auch spontane Selbstbestäubung in verschiedenem Grade begünstigen.

5b) Einrichtungen zur Sicherung wirksamer Fremdbestäubung oder Kreuzbestäubung. 1. Das Aufgehen der Blüten (Chasmopetalie) aus dem geschlossenen Knospenzustand zur Zeit der völligen Ausbildung der Bestäubungsorgane ist der durchaus typische und weitaus häufigste Vorgang, durch den die Geschlechtsorgane freigelegt und die Narben für die Möglichkeit einer Fremdbestäubung exponiert werden. Die Bestäubung bei geöffneter Blüte wird im Gegensatz zur Kleistogamie als Chasmogamie bezeichnet.

2. Trennung der Geschlechtsorgane nach verschiedenen Blüten, also Eingeschlechtigkeit (Diklinie) derselben macht Fremdbestäubung zur allein möglichen Bestäubungsweise. Die Geschlechtertrennung ist entweder so entwickelt, daß männliche und weibliche Blüten sich auf demselben Pflanzenindividuum befinden (Einhäusigkeit, Monöcie), oder so daß die beiderlei Blüten auf verschiedene Pflanzenstöcke verteilt sind (Zweihäusigkeit, Diöcie); in letzterem Falle ist nur Kreuzbestäubung, im ersteren daneben auch Nachbarbestäubung möglich; doch wird auch hier Kreuzung begünstigt, wenn die männlichen und weiblichen Blüten nicht gleichzeitig zur Geschlechtsreife gelangen, sondern hierin entweder die männlichen (Metagynie) oder die weiblichen vorauseilen (Metandrie). Von zahlreichen Pflanzen mit eingeschlechtigen Blüten hat man Grund anzunehmen, daß auch ihre Vorfahren immer eingeschlechtige Blüten gehabt haben; man bezeichnet sie deshalb als primär oder ursprünglich eingeschlechtig und stellt sie damit den sekundär oder nachträglich eingeschlechtigen gegenüber, bei denen die Abstammung von zwitterblütigen Vorfahren und ein allmähliches Verkümmern der einen Art von Geschlechtsorganen in der Zwitterblüte wahrscheinlich ist.

3. Die sekundär diklinen Pflanzen hängen mit den zwitterblütigen durch Formen zusammen, bei denen die Blüten morphologisch beiderlei Geschlechtsorgane aufweisen, die eine Gruppe aber soweit rückgebildet ist, daß sie zur geschlechtlichen Funktion unfähig geworden ist, die Blüten also physiologisch als eingeschlechtig zu betrachten sind. Solche Blüten nennt man scheinzwitterig; bei den weiblich fungierenden öffnen sich die Antheren der Staubblätter nicht und enthalten häufig verkümmerte Pollenkörner, die anderen zeigen verkümmerte Pistille, an denen sich keine Narben ausbilden und die Samenanlagen nicht befruchtungsfähig sind. Man hat von derartigen Blüten auch die ersteren adynamandrisch oder gynodynamisch, die letzteren adynamogynisch oder androdynamisch genannt.

4. Unter Polygamie (Vielehigkeit) versteht man diejenige Ausbildung von Blüten, bei der an einer und derselben Pflanzenart neben Zwitterblüten auch eingeschlechtige auftreten, die selbstverständlich nur zur Herbeiführung von Allogamie dienen können, während die Zwitterblüten je nach ihrer Einrichtung Fremd- oder Selbstbestäubung ermöglichen. Polygamie ist unter den Blütenpflanzen sehr verbreitet und hat sich in mancherlei Abstufungen und Zusammenstellungen ausgebildet, die mit bestimmten Bezeichnungen belegt werden:

Andromonöcie: neben Zwitterblüten kommen männliche auf demselben Pflanzenstock vor.

Androdiöcie: neben zwitterblütigen Stöcken gibt es solche mit lauter männlichen Blüten.

Gynomonöcie: Zwitterblüten und weibliche Blüten sind auf demselben Individuum vorhanden.

Gynodiöcie: zwitterige und weibliche Blüten sind auf getrennte Individuen verteilt.

Trimonöcie (Cönomonöcie): auf demselben Pflanzenstock sind zwitterige, männliche und weibliche Blüten vorhanden.

Triöcie (Dreihäusigkeit): zwitterige, männliche und weibliche Blüten sind auf dreierlei verschiedene Pflanzenstöcke verteilt.

Innerhalb dieser Gruppen gibt es Uebergänge und mancherlei Variationen; u. a. kann dieselbe Pflanzenart andromonöcisch und androdiöcisch, oder gynomonöcisch und gynodiöcisch auftreten, ein Verhältnis, das als Pleogamie bezeichnet wird (vgl. den Artikel „Geschlechtsverteilung“).

5. Geschlechterspaltung heißt die Erscheinung, daß bei Zwitterblüten Sexualformen auftreten, die ohne Verkümmerung des einen oder anderen der beiderlei Bestäubungsorgane trotzdem physiologisch die Blüten in verschiedenem Grade eingeschlechtig machen. Der häufigste hierher gehörige Fall ist:

a) die Dichogamie, d. h. die ungleichzeitige Geschlechtsreife der beiderlei Bestäubungsorgane, so daß demnach die Blüte in physiologischer Hinsicht zeitweise als eingeschlechtig betrachtet werden muß. In den ausgeprägten Fällen eilt die eine Kategorie der Bestäubungsorgane der anderen in der Entwickelung so weit voraus, daß sie bereits abgeblüht und funktionslos sind, wenn die nachfolgende Kategorie sich völlig ausgebildet hat; dann befindet sich die Blüte während ihrer ganzen Dauer in einem eingeschlech-

tigen Zustand und kann nur der Allogamie dienen. Nicht selten werden aber die später entwickelten Sexualorgane bereits geschlechtsreif, wenn die früher ausgebildeten des anderen Geschlechtes noch nicht ganz verblüht sind; dann macht also die Blüte einen mittleren Zwitterzustand durch, in dem Selbstbestäubung möglich ist. Die Dichogamie tritt in zwei Formen auf:

Protandrie (Proterandrie, Vormännlichkeit, Erstmännlichkeit, Staubblattvorreife, Pollenvorreife); in der Zwitterblüte entwickeln sich zuerst die Staubblätter, später die Narben zur Geschlechtsreife (Fig. 6).

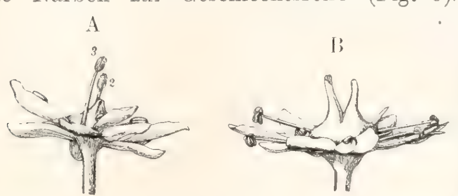


Fig. 6. Protandrische Blüte von Saxifraga aizoides, von der Seite gesehen. 2 fach vergrößert. A erster, männlicher Zustand mit 2 aufgesprungenen Antheren 2 und 3. B späterer, weiblicher Zustand mit entwickelten Narben.

Protogynie (Proterogynie, Vorweiblichkeit, Erstweiblichkeit, Narbenvorreife); in der Zwitterblüte eilen die Narben in ihrer Entwickelung den Staubblättern voraus (Fig. 7).

Liegt zwischen den beiden eingeschlechtigen Stadien einer dichogamen Blüte kein

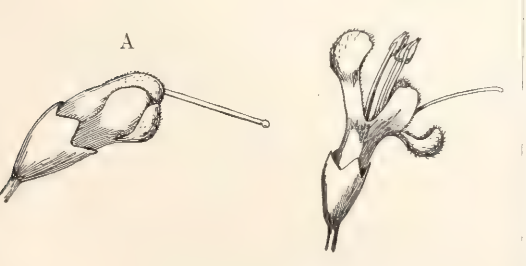


Fig. 7. Protogynische Blüte von Euphrasia lutea, von der Seite gesehen. 3 fach vergrößert. A junge, noch nicht geöffnete Blüte im weiblichen Zustand. B ältere, völlig geöffnete Blüte im männlichen Zustand.

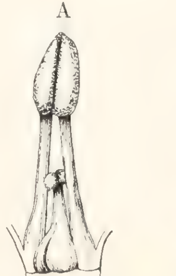
oder ein nur kurzes zwitteriges Stadium, so nennt man die Dichogamie ausgeprägt; dagegen schwach, wenn das zwitterige Stadium von überwiegender Zeitdauer ist. In diesem Falle nennt man die Erscheinung auch Homodichogamie und unterscheidet protandrisch-homogame und protogynisch-homogame Blüten.

Das Schwanken einer Spezies zwischen protandrischer und protogynischer Dichogamie heißt Heterodichogamie, das Schwanken zwischen Homo- und Dichogamie Homodichogamie.

b) Herkogamie ist eine Blüteneinrichtung, bei der in einer Zwitterblüte trotz gleichzeitiger Entwickelung der beiderlei Geschlechtsorgane durch die räumliche Anordnung der Staubbeutel und Narben spontane Selbstbestäubung unmöglich, Autogamie überhaupt erschwert und Allogamie durch äußere Hilfe begünstigt wird.

c) Heterostylie (Verschiedengriffeligkeit) wird das Vorhandensein verschiedener Blütenformen auf getrennten Stöcken einer und derselben Pflanzenart genannt, wobei die Blüten einen Unterschied in den Höhenstufen zeigen, die von den Narben und den Staubbeuteln in jeder Blüte eingenommen werden. Die Höhe, in der die Narben stehen, hängt von der Länge der Griffel ab, die Höhe, in der sich die Antheren befinden, von der Länge oder auch von der Einfügungsstelle der Staubfäden. Oefters nehmen die Narben einerseits, die Staubbeutel andererseits in jeder Blütenform zwei verschiedene Höhenstufen ein (Fig. 8) und es existieren demgemäß

Fig. 8. Bestäubungsorgane der dimorph heterostylen Blüten von Forsythia suspensa. 4fach vergrößert. A aus der kurzgriffeligen, B aus der langgriffeligen Form.





zwei Blütenformen, in denen diese Höhen sich wechselweise entsprechen; man unterscheidet sie als langgriffelige (mit unterhalb der Narben stehenden Antheren) und kurzgriffelige (mit unterhalb der Antheren stehenden Narben), und nennt die ganze Erscheinung Dimorphismus (Heterodistylie). Seltener sind in einer heterostylen Blüte drei Höhenstufen ausgeprägt (Fig. 9), wovon eine von den Narben, die beiden anderen von zwei Staubblattgruppen eingenommen werden (Trimorphismus, Heterotristylie); dann tritt zu der lang- und kurzgriffeligen Blütenform noch eine mittelgriffelige. Durch eingehende Versuche ist festgestellt, daß die Heterostylie die Kreuzung der mit den verschiedenen Blütenformen ausgestatteten Pflanzenstöcke herbeiführt, weil die wirksamsten und zugleich die von den blumenbesuchenden Insekten am häufigsten bewirkten Bestäubungen immer diejenigen sind, die sich zwischen den Geschlechtsorganen gleicher Höhenstufe, also getrennter

Individuen, abspielen. Es sind also in jeder Blüte die Bestäubungsorgane nicht gegenüber den andersgeschlechtigen derselben Blüte und desselben Pflanzenstockes, sondern nur gegenüber denen von anderen Stöcken vorzugsweise funktionsfähig. Bisweilen kommt ein Schwanken der Blüten derselben Spezies zwischen Heterostylie und gleichbleibender Griffellänge (Homostylie) vor; solche Blüten heißen homoheterostyl.

Mit der Heterostylie darf nicht die Anisostylie (Ungleichgriffeligkeit) verwechselt werden, bei der zwar auch die Griffellänge in verschiedenen Blütenformen schwankt, aber homogamen Blüten werden oft die Bestäubungsorgane in eine gegenseitige Stellung gebracht, welche Allogamie begünstigt oder ermöglicht, Autogamie aber erschwert oder ausschließt.

9. Die früher (unter 4) erwähnte Selbststerilität verhindert zwar nicht den Eintritt von Selbstbestäubung, macht sie aber unwirksam und demgemäß die Allogamie allein wirksam. Den selbststerilen Pflanzen stehen solche nahe, in deren Blüten bei gleichzeitiger Bestäubung mit eigenem und mit xenogamem Pollen der letztere einen überwiegenden Einfluß ausübt und die Befruchtung vollzieht.



Fig. 9. Trimorph heterostyle Blüten von Lythrum salicaria im Längsschnitt. 3 fach vergrößert. A langgriffelige, B mittelgriffelige, C kurzgriffelige Form.

das entsprechende Verhalten der Staubblätter fehlt und ein Nutzen für die Erzielung der Befruchtung nicht bekannt ist.

7. Enantiostylie (Rechts- und Linksgriffeligkeit) ist eine Blütenstruktur, bei der die beiderlei Bestäubungsorgane nach den beiden Seiten der Zwitterblüte so herübergebogen sind, daß Insekten, welche die Blumen besuchen, mit der rechten und linken Seite ihres Körpers die ungleichnamigen Organe berühren müssen. Da nun in einem Teil der Blüten die Griffel die rechte, die Staubblätter die linke Seite der Blume einnehmen (Rechtsgriffeligkeit), ein anderer Teil sich aber entgegengesetzt verhält, so müssen die Insekten mit ihren beiden Seiten in den verschiedenen Blüten bald die Narben, bald den Pollen berühren und somit Fremdbestäubungen vollziehen.

8. Nicht selten führen die Geschlechtsorgane in Zwitterblüten Bewegungen aus, durch die eine Abwendung der an den Antheren haftenden Pollenmassen von den Narben derselben Blüte erzielt oder die Entfernung der beiderlei Organe voneinander vergrößert wird (gamotropische Bewegungen). Solche Bewegungen kommen nicht selten in Verbindung mit Dichogamie vor (Bewegungsdichogamen), aber auch in

In der Ausbildung und Verwendung von Autogamie, von endogamer und exogamer Bestäubungsweise verhalten sich die verschiedenen Arten der Blütenpflanzen höchst mannigfaltig; sie bilden eine zusammenhängende Reihe, an deren Anfang die eine, und an deren Ende die andere Bestäubungsform herrscht, während im mittleren Teil der Reihe beide einander ungefähr das Gleichgewicht halten. Das Ueberwiegen der Allogamie kann sich bis zur Alleinherrschaft und zur Unterdrückung des Autogamie steigern; dagegen ist ausschließliche Autogamie ohne die Möglichkeit der Eintrittes von Allogamie eine höchst seltene Erscheinung. Jede der beiden Bestäubungsarten hat ihre Vorteile und beansprucht eine selbständige Bedeutung: Endogamie begünstigt die sichere Vererbung und Befestigung schon vorhandener Eigenschaften und Anlagen, Exogamie dagegen die Kräftigung, Umformung und Neubildung von Anlagen. So wird es erklärlich, daß bei der großen Mehrzahl aller Blütenpflanzen, soweit die Erfahrungen reichen, beide Bestäubungsweisen, wenn auch jede in sehr verschiedenem Umfange, verwirklicht erscheinen.

6. Vollzug der Bestäubung. Mit Aus-

nahme der Fälle, in denen spontane Selbstbestäubung eintritt, ist zum Vollzug einer Bestäubung immer die Mitwirkung eines äußeren Agens notwendig, durch welches der an der Anthere dargebotene Pollen auf die geeignete Narbe (bzw. Mikropyle) übertragen wird. Die dabei in Betracht kommenden Agentien sind: das Wasser, die Luftströmungen und Tiere, welche die Blüten besuchen. Danach unterscheidet man Wasserblütler (Hydrogamae — H), Windblütler (Anemogamae — A) und Tierblütler (Zoidiogamae — Z). Mittel- und Uebergangsstufen zwischen diesen Blütenklassen, die übrigens nicht häufig vorkommen, bei denen die Bestäubung durch zwei verschiedene der genannten Agentien vermittelt werden kann, hat man als Heteromesogamae bezeichnet.

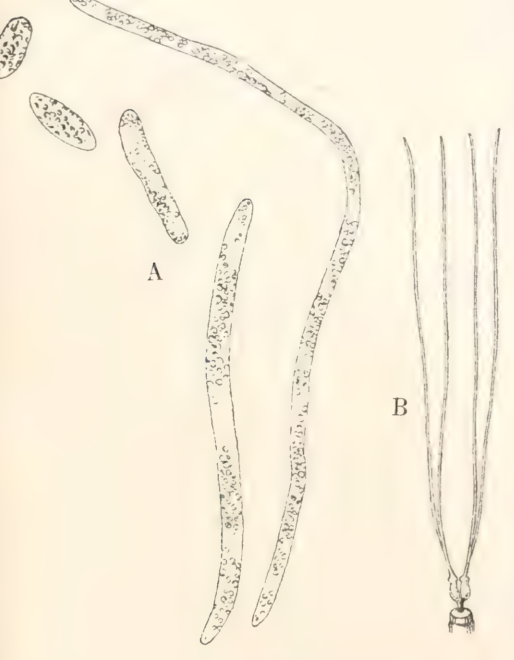


Fig. 10. Wasserblütigkeit von Cymodocea nodosa. A Pollenkörner, noch in der Verlängerung begriffen; 250 fach vergrößert. B weibliche Blüte, von ihrem Hüllblatt befreit; natürliche Größe.

6a) Wasserblütigkeit (Hydrogamie, Hydrophilie). Sie kommt im ganzen nur selten, und nur an Wasserpflanzen vor, und vollzieht sich in der Weise, daß entweder der ausgestreute Pollen oder ganze abgelöste männliche Blüten durch die Strömungen des Wassers zu den Narben transportiert werden. Die Bestäubung kann entweder unter Wasser an den im Wasser sich ausbreitenden Narben (Fig. 10) erfolgen (Hyphydrogamicae), oder an der Oberfläche des Wassers in der Luft (Ephydrogamicae). In beiden Fällen sind an den Bestäubungsorganen besondere Vorrichtungen entwickelt, um den Pollen an die Wasseroberfläche zu befördern oder zum Schwimmen unter Wasser geeignet zu machen; die Pollenkörner der Hyphydrogamen sind gegen Benetzung unempfindlich, nur von einer einfachen Haut umschlossen, ungefähr von demselben spezifischen Gewicht wie das Wasser und oft von einer faden- oder wurmförmigen Gestalt (confervoider Pollen), die gewissermaßen zur Ergreifumg der im Wasser flutenden Narben geschickt ist.

6b) Windblütigkeit (Anemogamie, Anemophilie). Sie stellt gegenüber der Tierblütigkeit eine niedere Stufe der Bestäubungseinrichtungen dar, insofern als Windblütler einen einfachen Blütenbau zeigen und sich vorzugsweise bei solchen Pflanzenfamilien finden, die man auch nach ihren sonstigen Merkmalen als die niedersten Gruppen der Hauptabteilungen der Blütenpflanzen anzusehen pflegt. Windblütig sind alle noch lebenden Gymnospermen mit Ausnahme der Gnetaceen-Gattungen Ephedra und Welwitschia, unter den Dikotyledonen namentlich die primär diklinen Amentaceen mit Ausnahme von Castanea und Salix, unter den Monokotyledonen besonders die Glumiflorae. Aber auch innerhalb der sonst zoidiogamen Familien treten einzelne Gattungen und selbst Arten auf, bei denen die Blüten unter Erscheinungen anemogam sind, die auf eine Rückbildung aus ursprünglich höher organisierten zoidiogamen Vorfahren schließen lassen; deshalb ist von manchen Forschern (namentlich Robertson) die Ansicht einer phylogenetischen Ursprünglichkeit der Anemogamen angezweifelt und vielmehr ihre Abstammung von entomogamen Vorfahren angenommen worden. Dies scheint jedoch wenig wahrscheinlich, und überhaupt gehen die Verschiedenheiten der Bestäubungseinrichtungen so wenig mit dem parallel, was man als gesichert über die natürliche Verwandtschaft der Pflanzengruppen ansehen darf, daß sie im allgemeinen nicht geeignet erscheinen, um phylogenetische Betrachtungen an sie zu knüpfen. Die Windblütler stehen zwar an Artenzahl gegen die Tierblütler zurück, machen aber im Bereich der mitteleuropäischen Flora etwa 19% aller Blütenpflanzen aus; in nordischen Gegenden steigt ihr Prozentsatz bis auf 38, und auch die windreichen Nordseeinseln weisen 36,25 und sogar (die Halligen) 47,3% Anemogamen unter ihren Phanerogamen auf.

Die Blüten dieser Pflanzen sind häufig eingeschlechtig, die zwitterigen oft dichogam, namentlich protogynisch; sie kennzeichnen sich durch große Unscheinbarkeit, haben eine geringe Größe, und grünliche oder son-

stige wenig in die Augen fallende Färbungen; dazu kommt noch ihre Duftlosigkeit, lauter leicht verständliche Eigenschaften, da ja für eine Vermittelung der Bestäubung durch den Wind Augenfälligkeit, Schönheit und Duft der Blüten von keinem ersichtlichen Nutzen wäre. Dagegen zeigen die Anemogamen auch positive Merkmale, an denen sie sich erkennen und namentlich von den Zoidiogamen unterscheiden lassen. Da es ganz dem Zufall anheimgestellt ist, wohin der den Luftströmungen anvertraute Pollen verweht wird und ob er die geeignete Narbe erreicht, die häufig in einer anderen Blüte, nicht selten auf einem weit entfernten Pflanzenindividuum sich befindet, so muß sehr viel Blütenstaub nutzlos ausgestreut und deshalb eine große Menge davon produziert werden. Struktur und Stellung der Blüten erleichtert die Tätigkeit des Windes, dem ungehinderter Zutritt zu den Bestäubungsorganen gestattet wird. Die Antheren werden von jedem Lufthauch entweder selbst so in Bewegung versetzt oder so getroffen, daß der aus ihnen entlassene Pollen, der eine lockere staubige trockene Masse dar-

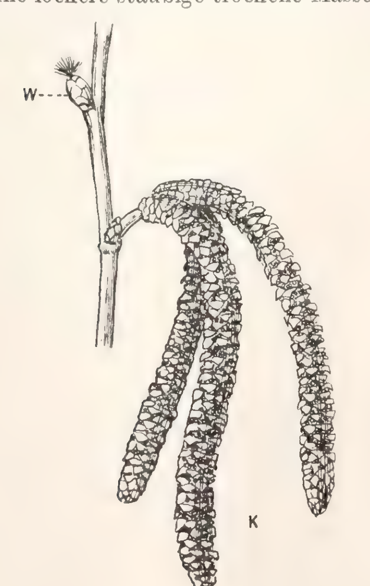


Fig. 11. Kätzchenförmiger Typus der Windblüten: Männliche Kätzchen (K) des Haselstrauches; bei W ein weiblicher Blütenstand. Natürliche Größe.

stellt, in kleinen Wölkchen entlassen wird, ohne an den geöffneten Staubbeuteln hängen zu bleiben; die Pollenkörner besitzen eine glatte Exine und zwischen sich keinerlei klebrige Substanz. Das weibliche Organ fängt bei den Gymnospermen den in der Luft schwimmenden Pollen durch das früher (unter IB) erwähnte, von der Mikropyle ausgesonderte Bestäubungströpfchen auf. Die Narbe der windblütigen Angiospermen entwickelt eine hinreichend große Oberfläche, um die vom Winde verwehten Pollenkörner auffangen zu können: entweder ist sie auffallend groß oder in feine Aestchen pinselförmig oder federartig zerteilt und mit zahlreichen Härchen besetzt, zwischen denen die angetriebenen Pollenkörner leicht einen Halt finden. Für die angiospermischen Windblütler hat Delpino folgende Typen aufgestellt:

1. den kätzchenblütigen (Amentiflorae) mit herabhängenden kätzchenförmigen männlichen und weiblichen oder wenigstens männlichen Blütenständen (Fig. 11);

2. den hängeblütigen (Penduliflorae) mit herabhängenden Einzelblüten (Fig. 12);



Fig. 12. Hängeblütiger Typus der Windblüten: männliche Blüte von Cannabis sativa. 4 fach vergrößert.

3. den langstaubfädigen (Longistamineae) mit langen dünnen Staubfäden und sehr leicht auf ihnen beweglichen Antheren (Fig. 13);

4. den losschnellenden (Explodiflorae) mit in der Knospe eingekrümmten und elastisch gespannten Staubfäden, die beim Aufgehen der Blüte unter Geradestreckung losschnellen und den Pollen aus den in demselben Moment aufplatzenden Antheren fortschleudern (Fig. 14);



Fig. 13. Langstaubfädiger Typus der Windblüten: blühendes Aehrchen von Trisetum flavescens mit einer offenen und einer wieder geschlossenen Blüte. 6 fach vergrößert. Aus „Lebensgeschichte der Blütenpflanzen“ von Kirchner, Loew und Schröter.

5. den unbeweglichen (Immotiflorae) mit feststehenden Antheren, aus denen der Pollen unmittelbar oder nachdem er zeitweise an einer geeigneten Stelle in der Blüte abgelagert worden ist, vom Winde ausgeblasen wird (Fig. 15).

Mit der nächstfolgenden Gruppe der Zoidiogamen, speziell den Entomogamen sind die Windblütler durch mehrere Uebergangsformen verbunden (Anemo-Entomogamae); die eine drückt sich darin aus, daß Blüten neben den charakteristischen Merkmalen der Anemogamie auch noch durch Augenfälligkeit oder Duft oder beides Insekten zum Besuch anlocken (Windblumen); eine andere darin, daß entomogame Blüten in einem späteren Blühzustand ihren lockeren stäubenden Pollen dem Windtransport aussetzen.

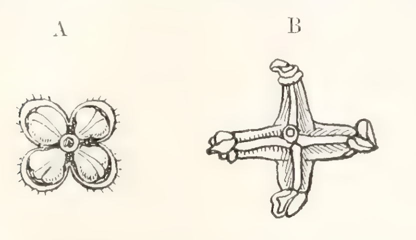


Fig. 14. Losschnellender Typus der Windblüten: männliche Blüte von Urtica dioica, von oben gesehen. 6 fach vergrößert. A unmittelbar vor, B nach dem Losschnellen der 4 Staubblätter.

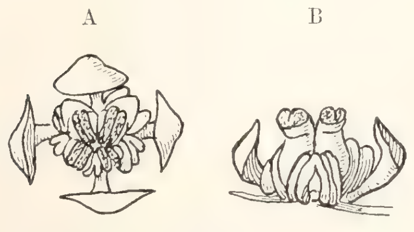


Fig. 15. Unbeweglicher Typus der Windblüten: Potamogeton lucens. 6 fach vergrößert. A Blüte von oben gesehen, mit verwelkten Narben und geöffneten Antheren; B dieselbe von der Seite, nach Entfernung des vorderen perigonblattähnlichen Konnektives. Aus „Lebensgeschichte der Blütenpflanzen" von Kirchner, Loew und Schröter.

6c) Tierblütigkeit (Zoidiogamie, Zoidiophilie). Sie umfaßt die häufigsten Formen der Bestäubungseinrichtungen, nicht nur in der mitteleuropäischen Flora, sondern in der gesamten Welt der Blütenpflanzen, und wird bei uns, da hier Insekten fast die ausschließlichen Besucher und Bestäuber der Tierblütler sind, im wesentlichen durch die Insektenblütigkeit (Entomogamie, Entomophilie) repräsentiert; auf sie bezieht sich deshalb vorzugsweise die folgende Schilderung der Eigentümlichkeiten der Zoidiogamen, sie findet aber in allen wesentlichen Punkten besonders auch auf die Vogelblütler Anwendung, weil die als Blumenbestäuber tätigen Vogelgruppen sich in ihrem Benehmen an den Blüten und in ihren Anpassungen an Blumennahrung ganz ähnlich wie gewisse große Insekten, namentlich Schmetterlinge verhalten.

Die Klasse der Tierblütler ist durch bestimmte Merkmale gegenüber den Windblütlern und den regelmäßigen Selbstbestäubern kenntlich gemacht; es sind das eben die Eigentümlichkeiten, die zunächst die Tiere zum Besuch der Blüten veranlassen, weiter aber bei Eintritt dieses Besuches den Blüten den Vollzug wirksamer Bestäubungen durch Vermittelung der Tiere sichern. Zum Besuch der Blüten lassen sich Tiere einmal dadurch bewegen, daß die Blüten gewisse für die Tiere anziehende Anlockungsmittel entwickeln, dann aber häuptsächlich dadurch, daß sie in den Blüten Genußmittel, bisweilen auch andere nutzbare Stoffe oder ein Obdach vorfinden.

α) Anlockungsmittel. 1. Zunächst handelt es sich, um Tierbesuch anzulocken, darum, daß die Blüten für ihre Gäste leicht wahrnehmbar sind, und so zeichnen sie sich denn im allgemeinen vor den Windblütlern und Selbstbestäubern durch die Augenfälligkeit aus, die sich auch dem oberflächlichen Beobachter so bemerklich macht, daß wir im Deutschen solche durch Farbenkontrast von dem Grün der Belaubung, bisweilen auch vom nackten oder mit toten Blättern bedeckten Boden sich abhebende Blüten als Blumen bezeichnen. Alles was die Augenfälligkeit der Blumen bedingt, faßt man als ihre Schauapparate zusammen. Diese werden vorzugsweise durch Organe gebildet, die ihrer morphologischen Natur nach der Blüte selbst angehören (florale), nicht selten werden sie aber teilweise oder auch vollständig ersetzt durch zur Blüte nicht gehörige Bildungen verschiedenen morphologischen Wertes (extraflorale). Florale Schauapparate werden in der Regel durch die Blütenhüllen, und wenn diese in Kelch und Krone geschieden sind, meistens durch die Krone hergestellt. Größe, Form und Farbe der Blütenhüllen pflegen gegen die Belaubung oder gegen die sonstige Umgebung der Blüten deutlich abzustechen; die in eine Ebene projizierte augenfällige Oberfläche einer Blüte wird als deren Schaufläche bezeichnet, sie steht oft senkrecht zur Blütenachse, kann aber auch einer durch diese gelegten senkrechten Ebene parallel sein. Zunächst hängt die Augenfälligkeit einer Einzelblüte vom Durchmesser ihrer Schaufläche ab, und in dieser Hinsicht herrschen die größten Verschieden-

heiten von Blüten mit kaum 1 mm Durchmesser bis zu Riesenblumen, wie denen von Aristolochia Goldieana, die eine Länge von 66 und eine Breite von 28 cm erreichen, oder gar von Rafflesia Arnoldi mit einem Durchmesser von 1 m. Die Form der Blumen wird besonders durch die in ihr herrschenden Zahlen- und Symmetrieverhältnisse bedingt; s. unter Blüte. Die Blütenfarben sind bei den Tierblütlern nur selten grün, grünlich oder bräunlich, wie es bei den Windblütlern so häufig vorkommt, sondern weiß, gelb, rot, blau oder Mischungen und Zusammensetzungen dieser Farben; sie entwickeln sich vorzugsweise oder ausschließlich auf den Flächen der Blütenhüllblätter, die den besuchenden Tieren zugewendet sind; die abgewendeten Seiten sind oft grünlich oder wenig intensiv gefärbt, und an tiefen Blüten zeigen meistens die inneren tieferen Partien weniger lebhafte Farben. Nicht selten erhöhen Farbenkontraste zwischen einzelnen Blütenteilen, Zeichnungen in Form von Flecken, Punkten, Streifen, Linien usw. die Augenfälligkeit der Blüte. Bisweilen ändert sich im Verlauf des Blühens die Färbung der ganzen Blüte oder ihrer Zeichnungen, es treten also Umfärbungen ein.

Der Kelch kann durch seine Größe und Färbung die Wirkung der Krone unterstützen, oder übernimmt, wenn die Krone gar nicht ausgebildet oder zu einer andersartigen Verrichtung umgeprägt ist, ganz deren Rolle (viele Ranunculacae, Fuchsia, Warszewiczia). Auch die Staubblätter erhöhen, besonders wenn sie in größerer Zahl vorhanden sind, durch ihre Färbung oft den optischen Effekt der Blüte (Myrtaceae, Mimosaceae), ja sie können in einzelnen Fällen, wenn die Blütenhüllen nicht ausgebildet, sehr unscheinbar oder sehr hinfällig sind, deren Augenfälligkeit für sich allein hervorrufen (Thalictrum-Arten, Pandanus); hierher gehören Vorkommnisse, wo Staubblätter zu Staminodien umgebildet nur noch als Schauapparate dienen (Carludovica). Seltener ist das Gynoeceum (Iris) oder die verlängerte Blütenachse in einer solchen Weise ausgebildet, daß sie die Sichtbarkeit oder Auffälligkeit der Blüte mit beeinflussen.

Sehr wesentlich wird die optische Wirkung der Blüten in den überaus zahlreichen Fällen vergrößert, wo sie sich in bestimmter Anordnung zu Blütenständen zusammenschließen. Dabei werden die Laubblätter unterdrückt und die Blüten einander in solchen Mengen und so sehr genähert, daß von einiger Entfernung der Blütenstand als Ganzes wirkt, und auch kleine Einzelblüten als Mitglieder der Blütengesellschaft von deren Augenfälligkeit Nutzen ziehen. Die gemeinsame Schaufläche der Blütenstände ist bald so ausgebildet, daß sie nur in einer bestimmten Richtung, bald so, daß sie allseitig zur Geltung kommt; ersteres z. B. bei doldigen und doldenähnlichen, letzteres bei traubigen und rispigen Blütenständen. Doch wird nicht selten abgesehen vom morphologischen Aufbau des Blütenstandes eine vorzugsweise von der Seite zur Wirkung kommende Augenfälligkeit durch Einseitswendigkeit traubiger Blütenstände erreicht, die bald durch Krümmungen der Blütenstiele, bald durch Unterdrückung der Blüten auf einer Seite der Blütenstandsachse herbeigeführt wird. Eine Eigentümlichkeit von doldigen, trugdoldigen und kopfigen Blütenständen mit ziemlich ebener, kreisrundlicher Oberfläche ist die zuweilen zu beobachtende Ausbildung sogenannter strahlender Blüten am Umfange des Blütenstandes, d. h. Blüten, deren Blütenhüllblätter sämtlich oder nur gegen die Außenseite des Blütenstandes hin auffallend vergrößert sind und dadurch die Augenfälligkeit des Blütenstandes steigern; sie kommen bei Umbelliferen, Compositen, Cruciferen u. a. vor, und können so vollständig in den Dienst des Schauapparates treten, daß ihre Geschlechtsorgane verkümmern oder ganz fehlschlagen (geschlechstlose Blüten).

Oekologisch gewissermaßen wie riesige Blütenstände fungieren ganze Bäume, die im Frühjahr vor Ausbruch des Laubes ihre Blüten entfalten (z. B. Kirsche, Weiden, Spitzahorn u. a.), oder wie tropische Leguminosen die Entwickelung ihrer Blüten in die laublose oder laubarme Vegetationsperiode verlegen.

Extraflorale Schauapparate kommen an Blütenständen zur Ausbildung und bedingen oder erhöhen deren Augenfälligkeit; sie finden sich in den Tropen häufiger als in unserer einheimischen Flora. Man kann sie unterscheiden als primäre oder reine, wenn sie als phylogenetisch alt angesehen werden dürfen und florale Schauapparate ganz ersetzen, und als sekundäre, wenn sie neben floralen Schauapparaten vorhanden sind und die Augenfälligkeit des Blütenstandes nur vergrößern.

Sowohl Blattorgane wie Achsen können zu extrafloralen Schauapparaten umgebildet werden, besonders häufig werden dazu Hochblätter verwendet, und zwar sowohl Deckblätter wie Hüllblätter, die dann ähnliche Formen und Farben zeigen wie die Blütenhüllblätter. Deckblätter dieser Art finden sich in schöner Ausbildung z. B. bei Salvia-Arten, Melampyrum, Bromeliaceen u. a.; oft aber sind sie in einer so charakteristischen Weise angeordnet, umgebildet, verwachsen u. ä., daß sich (nach Johow) bestimmte

Formen von extrafloralen Schauapparaten unterscheiden lassen.

1. Die Bracteenform, bei der gefärbte Deckblätter von einfacher Form und ohne Zusammenstellung zu blütenähnlichen Bildungen entwickelt sind (Salvia, Melampyrum).

2. Die Schopfform, bei der die gefärbten Hochblätter am Gipfel des Blütenstandes gehäuft auftreten (Arten von Melampyrum, Ananas).

3. Die Sternform, gebildet durch gefärbte Hochblatthüllen, welche ökologisch die Rolle einer Krone übernehmen. Hierher gehören die Hüllen einiger Umbelliferen, wie Astrantia, Arten von Bupleurum und Eryngium, die prachtvoll gefärbten Hochblätter von Bougainvillea, die Involucren an den Cyathien von Euphorbia, die farbigen und strahlenden Hüllkelche mancher Compositae.

4. Die Spathenform: einzelne große Hüllblätter (Spatha) umgeben den kolbenförmigen Blütenstand an seinem Grunde. Sie sind bei den Araceen öfters nur grün gefärbt und dann nicht sehr augenfällig, nicht selten aber weiß, rot oder gelb und bisweilen von sehr sonderbaren Formen. Bei den Scitaminaceen umhüllen zahlreiche Spathen die Teilblütenstände oder die Einzelblüten der sehr großen Kolben, sind groß und sehr lebhaft gefärbt, so daß die Blütenstände vorzugsweise ihnen die auffallende Farbe und Sichtbarkeit verdanken.

Sind die Achsenorgane in der Blütenregion, die Blütenstiele oder die Stiele des Blütenstandes, durch lebhafte Färbung zu Schauapparaten verwendet, so ergibt sich die Korallenform extrafloraler Schauapparate, wie sie sich z. B. bei Allium pulchellum, Muscari comosum, Grevillea glabrata, manchen Rubiaceen und Euphorbiaceen finden.

Als totale Schauapparate werden schließlich solche Vorkommnisse zusammengefaßt, wo die ganze Pflanze auf der Höhe ihrer Entwickelung durch ungewöhnliche und in die Augen fallende Färbung ausgezeichnet ist; dies kommt z. B. bei einigen buntblätterigen Croton- und Abutilon-Arten, sowie bei Hysterophyten vor, deren Körper gelbe, blaue oder rote Färbungen aufweist (Orobanche, Lathraea, Cytinus, Limodorum u. a.).

Die an den Schauapparaten zur Verwendung kommenden Färbungen werden bei den Pflanzen auf eine verhältnismäßig sehr einfache Weise durch Erzeugung einiger Pigmente hervorgebracht, die sich in den Zellen teils im Zellsaft gelöst, teils in Form gefärbter Chromatophoren, seltener von Kristallen vorfinden, Teile des auffallenden Lichtes absorbieren und die übrig bleibenden Lichtstrahlen reflektieren. Außerdem beeinflussen auch einige Erscheinungen des Glanzes das Aussehen der Schauapparate.

Rote, violette und blaue Farbstoffe stellen sich als Modifikationen der Anthokyane in verschiedenen Graden der Säuerung und der Alkaleszenz dar und sind fast ausnahmslos im Zellsaft gelöst; bei den gelben und orangegelben Farbstoffen Xanthin und Karotin ist das nur selten der Fall, sondern sie sind in der Regel an körnerförmige Chromatophoren (Chromoplasten) gebunden. Die in den Schauapparaten in deren jugendlichem Zustand meist vorhandenen Chloroplasten (Chlorophyllkörner) pflegen später zu verschwinden, können sich aber am Zustandekommen der Färbungen auch noch beteiligen. Die Farben vieler Blüten gehören zu den am meisten gesättigten, die man kennt, und werden nur von den farbenprächtigsten Edelsteinen übertroffen. Diese Lebhaftigkeit der Farben verdanken die Blüten vielfach einer lichtreflektierenden Schicht (Tapetum), die sich unter den gefärbten Epidermiszellen als weiße Unterlage befindet und meistens aus einem an lufthaltigen Intercellularen reichen farblosen parenchymatischen Gewebe besteht. Zur Erhöhung der Farbensättigung tragen auch die an Blütenblättern häufigen, kuppelförmig oder kegelig emporgewölbten Epidermiszellen bei: ihre Oberfläche bewirkt einerseits durch Brechung und Reflexion einen längeren Weg der Lichtstrahlen in den Pigmenten, andererseits eine Verminderung des an der Grenze zwischen Luft und Pflanzengewebe reflektierten weißen Lichtes. Die trotz der geringen Anzahl der verschiedenen Pigmente so große Mannigfaltigkeit der an den Schauapparaten auftretenden Farbentöne erklärt sich nicht nur aus der Farbenvariation und verschiedenen Sättigung der gelösten Farbstoffe, sondern namentlich dadurch, daß die Pigmente nach dem Prinzip der Additionsfarben und nach dem der Subtraktionsfarben sowie in der Kombination dieser beiden Prinzipien wirken können. Unter Additionsfarben werden diejenigen verstanden, die entstehen, wenn Strahlen, welche verschiedene Pigmente passiert haben, von dem Schauapparat so zurückkehren, daß sie von derselben Stelle zu kommen scheinen; es liegen dann nebeneinander Epidermiszellen von verschiedener Färbung oder verschiedener Sättigung, die aber so klein sind, daß sie vom menschlichen Auge nicht unterschieden werden können, oder es befinden sich in derselben Zelle zwei verschiedene Pigmente, eins gelöst und eins in Körnerform, deren Farben sich summieren. Subtraktionsfarben entstehen dadurch, daß von einer Stelle des Schauapparates nur die-

jenigen Strahlen zurückkehren, die von keinem unter mehreren Pigmenten absorbiert worden sind; es entstehen auf diese Weise vorzugsweise die stumpfen, braunen und schwärzlichen Färbungen, tiefes Schwarz insbesondere dann, wenn das eine farbige Pigment alle Strahlen des weißen Lichtes absorbiert, welche das andere farbige Pigment hindurchgelassen hat. Die weiße Farbe an Schauapparaten ergibt sich dann, wenn über einem farblosen reflektierenden Tapetum eine ebenfalls farblose Epidermis liegt. Fehlt eine solche reflektierende Schicht überhaupt, so bekommen die Schauapparate ein mehr oder weniger durchscheinendes, wachsartiges oder fleischiges Aussehen (manche Orchideen) und bringen ihre Färbungen mehr bei durchfallendem als bei auffallendem Licht zur Geltung.

2. Ein zweites Mittel, dessen sich die Blumen zur Anlockung von Tieren bedienen, ist die Entbindung von Düften, die bekanntlich bei ihnen sehr verbreitet, wenn auch für die menschliche Wahrnehmung nicht immer vorhanden ist. Meistens haben die Blumendüfte ihren Sitz in den Kronblättern, in deren Gewebszellen die Duftstoffe bereitet werden, ohne daß besondere Organe dafür erkennbar wären. Es sind sogenannte ätherische Oele, deren chemische Natur erst in einzelnen Fällen festgestellt worden ist; sie wurden als Verbindungen aus den Gruppen der Alkohole (z. B. Geraniol, Nerol, Eugenol, Linalol), der Aether (z. B. Vanillin, Piperonal), der Ketone (z. B. Iron, Ionon, Jasmon) und der Ester (z. B. Anthranilsäuremethylester, Benzoesäuremethylester, Salicylsäuremethylester) erkannt. Sie entstehen in äußerst geringen Mengen aus Kohlehydraten und Stickstoffverbindungen in den Zellen der Kronblätter.

Eine Klassifikation der Blumendüfte ist zuerst von Delpino, später von A. von Kerner versucht worden, ohne aber bisher zu der erwünschten Klarheit der Bezeichnungsweisen zu führen. Delpino unterschied sympathische und eigenartige Düfte und verstand unter ersteren (Odori simpatici) solche, die einer großen Menge verschiedenartiger Tiere und auch dem Menschen mehr oder weniger angenehm sind; hierunter begreift er als besondere Klassen die Wohlgerüche, die aromatischen und die fruchtartigen Düfte. Eigenartige (Odori idiopatici) nennt er Düfte, die nur wenigen Tieren sympathisch, der großen Mehrzahl aber antipathisch sind, mit den beiden Klassen der üblen Gerüche und der Ekeldüfte. In jeder dieser Duftklassen werden zahlreiche Arten von Gerüchen aufgeführt, die mit bekannten Düften verglichen und nach ihnen benannt werden, wie Jasmin-, Narzissen-, Aprikosen-, Wanzengeruch usw. Kerner versuchte, nach der chemischen Natur der Duftstoffe fünf Gruppen von Blumendüften aufzustellen, nämlich 1. indoloide Düfte, ähnlich denen, wie sie bei der Zersetzung eiweißhaltiger Substanzen entstehen und sich durch den üblen Geruch auszeichnen; 2. aminoide Düfte, denen primäre, sekundäre oder tertiäre Amine zugrunde liegen, z. B. Trimethylamin; 3. benzoloide Düfte, wie sie den Abkömmlingen des Benzols eigentümlich sind und die zahlreiche Wohlgerüche umfassen; 4. paraffinoide Düfte, denjenigen ähnlich, die den Säuren und Alkoholen der Paraffine eigen sind; 5. terpenoide Düfte, die von Terpenen herrühren. Zur Durchführung einer derartigen Einteilung, bei der im einzelnen wiederum die verschiedenen Düfte nach allgemein bekannten Gerüchen bezeichnet werden müssen, fehlen die chemischen Grundlagen noch zum allergrößten Teil, und was in dieser Beziehung bekannt ist, steht mit der Kernerschen Klassifikation vielfach nicht in Uebereinstimmung.

β) Genußmittel, welche die Blumen den besuchenden Tieren darbieten, sind vor allem der Blütenstaub (Pollen) und in den Blüten abgesonderter Nektar (Honig); in selteneren Fällen handelt es sich auch um anderweitige Genußmittel.

1. Der Pollen, der in allen zwitterigen und männlichen Blüten der Zoidiogamen ebenso wie der Wind- und Wasserblütler vorhanden ist, wird nur bei den Tierblütlern in einer solchen Weise beim Oeffnen der Antheren frei gelegt und dargeboten, daß er den die Blumen besuchenden Tieren zugänglich ist. Besonders sind es viele Blumeninsekten, die den Pollen als stickstoffhaltige Nahrung für sich oder für ihre Brut verwenden. Obwohl von der Blüte diesen Besuchern ein Teil des Pollens geopfert werden muß, bleibt doch davon immer noch eine genügende Menge übrig, um damit eine ausreichende Bestäubung zu vollziehen; immerhin ist der Pollen nicht seiner Hauptbedeutung nach als für die Besucher bestimmtes Genußmittel anzusehen.

2. Anders verhält es sich in dieser Hinsicht mit dem Nektar der Blüten, der für diese nur insofern von einer mittelbaren Bedeutung ist, als er lediglich zur Herbeiführung der die Bestäubung vollziehenden Besucher dient. Zwar gibt es unter den Tierblütlern auch solche, die ihren Besuchern kein anderes Genußmittel als Pollen darbieten, die später zu besprechenden Pollenblumen, aber weitaus die große Mehrzahl der Blumen scheidet Nektar ab und produziert ihn genau während der Zeit, in der Tierbesuch an den Blüten zur Herbeiführung der Bestäubung erwünscht ist.

Die Absonderung des Nektars fällt besonderen Organen zu, die man **Nektarien** (Honigdrüsen) nennt; sie stehen in den Blüten an denjenigen Stellen, die für ihre Verrichtung am günstigsten sind, können aber von sehr verschiedenartigem Aussehen und sehr verschiedenem morphologischen Wert sein. In den einfachsten Fällen ist das Nektarium nichts anderes als eine Nektar absondernde, nicht einmal immer durch Dicke oder Färbung ausgezeichnete Stelle an irgendeinem anderen, im übrigen gar nicht veränderten Blütenorgan (Fig. 16). Solche Nektarien

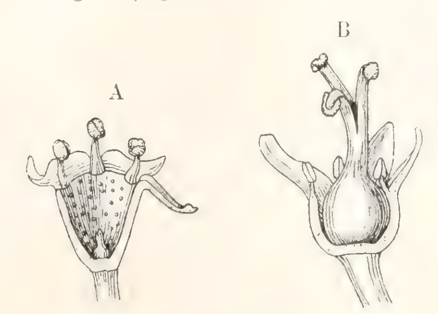


Fig. 16. Epimorphe Nektarien. Blüten von Rhamnus alaternus im Längsschnitt. 6 fach vergrößert. A männliche Blüte, das Innere des Kelches mit Nektartröpfchen besetzt; B weibliche Blüte, die Oberfläche des Fruchtknotens mit einer Nektarschicht bedeckt.

bezeichnet Delpino als **epimorph** und unterscheidet sie je nach ihrem Auftreten an verschiedenen Blütenorganen als **epikarpisch** (am Gynaeceum), **epistemonisch** (an den Staubblättern), **epipetal** (an den Kronblättern) und **episepal** (an den Kelchblättern). Unter den epikarpischen Nektarien verdienen die sogenannten **Septaldrüsen** eine besondere Erwähnung, bei denen der Nektar in Spalten oder Gängen zwischen den etwas auseinanderweichenden inneren Scheidewänden des Fruchtknotens abgesondert und durch bestimmte Oeffnungen nach außen ergossen wird. Unter **automorphen** Nektarien (Fig. 17) versteht Delpino solche, die zwar auch als Anhangsgebilde an anderen Blütenorganen auftreten, aber sich nach Gestalt, Färbung usw. so weit diferenziert haben, daß sie als besondere Organe hervortreten; sie können die Gestalt von zahnförmigen, zungenförmigen oder fädigen Drüsen haben, Ringe, Kreise oder Becher darstellen, oder sich in Form von Schüsselchen, Taschen, Gängen und Kanälen ausbilden, dabei auch wieder am Fruchtknoten, an oder zwischen den Staubblättern, Kron- oder Kelchblättern auftreten. Weniger häufig als die beiden genannten Arten der Nektarien sind die **metamorphen** (Fig. 18), die dadurch gekennzeichnet sind, daß ein Blütenorgan seine ursprüngliche Funktion ganz aufgegeben hat und völlig zu einem Nektarium umgeprägt worden ist; verhältnismäßig häufig erfahren die Kronblätter eine solche Umprägung zu „**Honigblättern**", z. B. bei zahlreichen Ranunculaceen, bei denen sich auch die

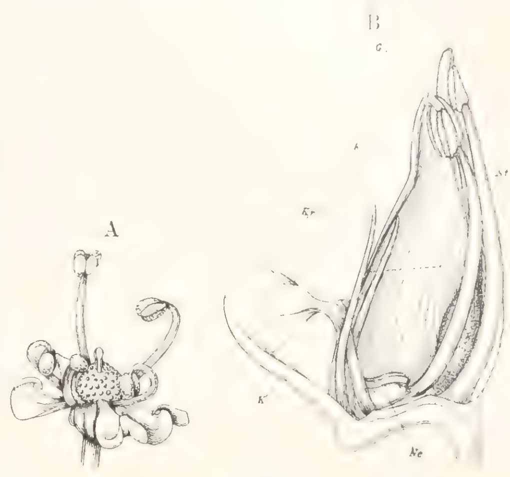


Fig. 17. Automorphe Nektarien. A Blüte von Imperatoria ostruthium (im ersten, männlichen Zustand) mit dem Nektartröpfchen absondernden Griffelpolster. 8 fach vergrößert. B Blüte von Melianthus minor nach Entfernung der vorderen Hälfte; im Grunde eine Nektardrüse Ne, deren Absonderung den ganzen unteren Teil der Blüte bis zu der punktierten Linie ausfüllt; K Kelch, Kr Kronblätter, St Staubblätter, G Griffelspitze. 2 fach vergrößert.

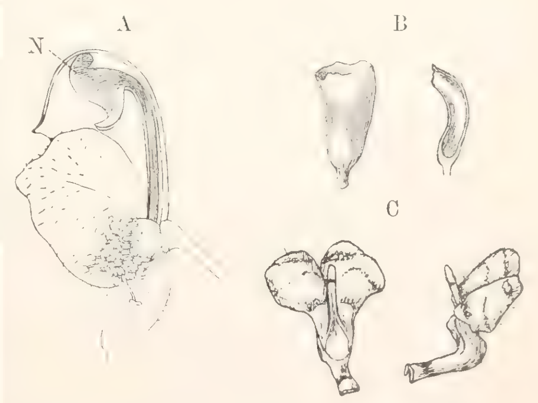


Fig. 18. Metamorphe Nektarien. A Blüte von Aconitum variegatum, nach Entfernung der vorderen Hälfte, innerhalb des oberen helmförmigen Kelchblattes eines der beiden zu Nektarien umgebildeten Kronblätter N. Natürliche Größe. B dütenförmiges Nektarblatt von Helleborus viridis, von innen und im Längsschnitt. 4 fach vergrößert. C Saftmaschine von Nigella arvensis, von oben und von der Seite gesehen. 4 fach vergrößert.

Form der komplizierten sogenannten Saftmaschinen (Nigella) findet; seltener werden Staubblätter oder auch nur deren Antheren zu Nektarien umgewandelt, ja es können sogar ganze Blüten eines Blütenstandes nur noch als Nektarien fungieren (Acacia-Arten, Leontopodium alpinum).

Der von den Nektarien abgesonderte Nektar wird den Blumenbesuchern in der Regel an derselben Stelle dargeboten, wo er entstanden ist, bisweilen fließt er aber an andere Orte in der Blüte, wo er geborgen und für die Besucher aufbewahrt bleibt; in allen Fällen, in denen der Nektar nicht frei und offen, allgemein sichtbar und zugänglich in der Blüte liegt, sondern in bestimmten Behältern geborgen ist, werden diese Nektarhalter (Safthalter) genannt; sie können die Form von Gruben, Löffeln, Bechern, Säckchen, Taschen, Beuteln, Röhren, Spornen, Krügen, Kammern usw. haben. Häufig werden in nektarhaltigen Blüten für die zur Bestäubung tauglichen Besucher Einrichtungen ausgebildet, um ihnen die Lage des Nektars anzuzeigen, die Nektarmale (Saftmale), die durch besondere Färbung, Flecke, Linien und Streifen den Weg zum Nektarhalter weisen; dazu treten bisweilen Anordnungen von Haaren, Wärzchen, Staminodien oder Staubblättern, welche ebenfalls die eindringenden Blumenbesucher auf den richtigen Weg leiten (Nektarwege). Da der Nektar durch in die Blüte fallenden Regen ausgewachsen oder verdorben werden kann, ferner aber für die Pflanzen nur dann von Nutzen ist, wenn er von solchen Tieren aufgesucht und genossen wird, welche dabei die Bestäubung vollziehen, so ist es leicht verständlich, daß sich in nektarhaltigen Blüten häufig Einrichtungen zum Schutze des Nektars vor Wetterungunst und vor unerwünschten Besuchern ausgebildet haben; sie werden als Nektardecken (Saftdecken) zusammengefaßt und können auch gleichzeitig zum Schutze des Pollens und anderer zarten Blütenteile dienen. Hierher gehört die Umkehrung oder horizontale Stellung von Blüten, Verschluß der Blütenöffnung, Biegung von Blütenröhren, Ausbildung von dach- und helmartigen Bildungen über dem Blüteneingang, von Leisten und Haarreihen, die das Hinabgleiten von Regentropfen und auch den Zutritt ungeeigneter Tiere zum Nektar hindern, Bergung des Nektars in tiefen und engen Nektarhaltern, und das früher erwähnte Schließen der Blüten bei schlechtem Wetter.

Die verschiedenen Formen der Nektarien stimmen darin überein, daß sie ein kleinzelliges zartwandiges Gewebe (Fig. 19) enthalten, in dessen Zellen sich unter anderem umgewandeltes Protoplasma und gelöste Kohlehydrate befinden, und welches mit sehr mannigfachen Sekretionsorganen ausgestattet ist. Die Ausscheidung des Nektars erfolgt entweder auf dem Wege der Diffusion durch nicht kutikularisierte Oberhautzellen oder dünnwandige Epidermispapillen, oder vermittelst Schleimbildung in den Zellwänden unterhalb der Cuticula, oder endlich durch die Spaltöffnungen in

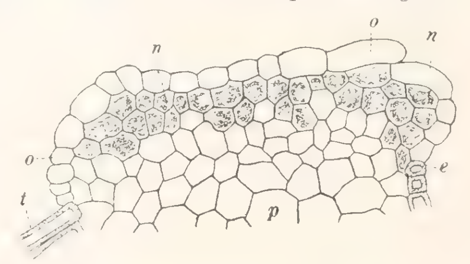


Fig. 19. Längsschnitt durch ein Nektarium von Alchimilla vulgaris; p Parenchym des Diskus, e dessen Epidermis, n Nektariumgewebe, o sezernierende Oberflächenschicht, t Haare. 300 fach vergrößert.

der Epidermis. Der offen aus der Oberfläche des Nektariums austretende Nektar besteht aus einer wässerigen Lösung von Traubenzucker und Rohrzucker in durchschnittlich etwa 25prozentiger Konzentration, die aber nicht nur bei verschiedenen Pflanzen, sondern auch bei derselben Art je nach äußeren Umständen erheblichen Schwankungen unterworfen ist. Ebenso große Verschiedenheiten sind hinsichtlich der Menge des in einer Blüte hervorgebrachten Nektars zu beobachten: von kaum nachweisbaren winzigen Tröpfchen sind alle Uebergänge vorhanden bis zu reichlich aus den Blüten hervortropfenden oder abfließenden Massen, wie sie namentlich bei den Vogelblütigen vorkommen. Begünstigt wird die Nektarabsonderung im allgemeinen durch reichliche Wasseraufnahme der Wurzeln und durch höhere Luftfeuchtigkeit; während eines sonnigen windstillen Tages fällt ein Maximum der Nektarproduktion auf den frühen Morgen, ein Minimum auf den Nachmittag; folgen auf Regenwetter schöne Tage, so steigert sich unter sonst gleichen Verhältnissen die Nektarabsonderung zu einem Maximum am zweiten oder dritten Tag, um nachher allmählich zu sinken.

Alle im Dienst der Bestäubung stehenden Nektarien bezeichnet man als nuptiale (im Gegensatz zu extranuptialen, die andere Bestimmungen haben); sie befinden sich fast immer in der Blüte selbst und heißen insofern florale, doch kommen selten auch solche vor, die sich in der Umgebung der Blüte befinden, ohne zu ihr selbst zu gehören; man nennt sie extraflorale (Euphorbia, Marcgravia).

Eigentümlich sind die sogenannten Scheinnektarien, Gebilde in den Blüten, die durch ihre Gestalt an Nektarien oder Nektarhalter erinnern und durch ihren Glanz ausgeschiedene Nektartröpfchen vortäuschen; man nimmt an, daß sie durch ihr Aussehen gewisse Insekten zum Besuch der Blüte verlocken, ohne ihnen dafür Nektargenuß zu gewähren; meistens sind außer ihnen in der Blüte auch noch echte Nektarien vorhanden.

3. In manchen Blüten, die keinen freien Nektar absondern, wird dieser durch zuckerreiche Säfte ersetzt, die in den Zellen oberflächlicher Gewebe eingeschlossen bleiben und nur von solchen Insekten ausgebeutet werden können, deren Mundwerkzeuge ein Anbohren der Gewebe gestatten (Orchis, Cytisus). Selbst die ganze Blütenhülle kann zu einem verdickten, süßen Gebilde werden, welches Besuchern der Blüte zur Nahrung dient.

4. Ein verhältnismäßig nicht seltenes Ersatzmittel für Nektar, welches sich namentlich bei tropischen Orchideen, aber auch bei einigen einheimischen Pflanzengruppen findet, sind die Futterhaare (Fig. 20), die in ihrem Inhalt reichliche Mengen von Eiweiß und



Fig. 20. Futterhaare aus der Blüte von Maxillaria rufescens. 200 fach vergrößert.

Fett führen und eine auffallend zarte Zellhaut besitzen; sie lassen sich von ihrem Fuß leicht abheben und von Insekten einsammeln.

5. Durch Auseinanderbrechen vielzelliger Haare bildet sich in seltenen Fällen (bei tropischen Orchideen) in Blüten eine mehlartig lockere, gelbe oder weiße Masse, die das Aussehen von Pollen hat (imitierter Pollen).

6. Den Futterhaaren stehen Futtergewebe (Fig. 21) nahe, die in Form von Schwielen, Buckeln oder Warzen bei tropischen Orchideen vorkommen, aus aufgelockerten, an Eiweiß und Fett reichen Zellen bestehen und zum Abweiden durch Insekten bestimmt sind.

7. Auch kaum süß schmeckende Gallertmassen, die von Bananenblüten abgesondert werden, dienen in Südbrasilien als Anlockungsmittel für eine Bienenart (Trigona).

c) In seltenen Fällen werden Blumenbesuchern andere für sie nutzbare Stoffe dargeboten, die nicht zu den Nahrungs- und Genußmitteln gehören. So scheiden einige

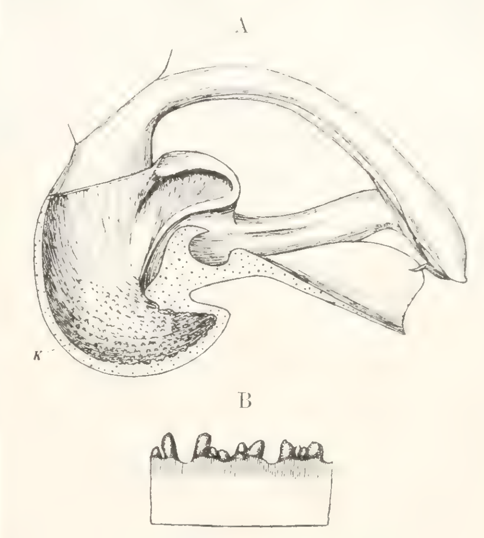


Fig. 21. Futtergewebe. A Im Innern des kesselförmigen Blütengrundes von Stanhopea platyceras bei K. Wenig vergrößert. B Stück eines Querschnittes durch dasselbe wärzchenförmige Futtergewebe. 8 fach vergrößert.

südbrasilianische Orchideen an gewissen Zellen ihrer Blütenhülle ein weißes vegetabilisches Wachs aus, welches von Immenarten aufgesucht und zum Bau ihrer Nester verwendet wird, und eine ebenfalls brasilianische Euphorbiacee (Dalechampia) bietet den Bestäubungsvermittlern ein von Schuppen abgesondertes zähes Harz dar, welches zu ähnlichen Zwecken dient.

d) Gewisse Blumen werden von bestimmten Insektengruppen nicht nur wegen der darin enthaltenen Nahrung aufgesucht, sondern weil sie ihren Gästen ein Obdach für vorübergehende Zeit oder einen gesicherten Schlupfwinkel bei ungünstiger Witterung gewähren. Derartige Blüten sind durch ihre Größe, Gestalt und Stellung geeignet, in sie hineinkriechende Insekten aufzunehmen und bieten diesen nicht nur einen geschützten, sondern nicht selten auch infolge der von der Blüte bei ihrer Atmung entwickelten Wärme einen durch Temperaturerhöhung angenehmen Aufenthalt. In einzelnen Fällen wird dieses Obdach zum zeitweiligen Gefängnis für kleine Mückenarten, aus dem sie erst nach

Vollzug der Bestäubung wieder entlassen werden, und bei den Gattungen Ficus und Yucca dient ein Teil der Samenanlagen der Insektenbrut als Nahrung und Aufenthalt.

7. **Die Bestäubungsvermittler** sind bei den Zoidiogamen diejenigen Tierarten, welche die Blumen zum Zweck der Gewinnung von Nahrung oder um anderer Vorteile willen aufsuchen und sich in oder an den Blumen so benehmen, daß sie sich an ihrem Körper sowohl mit Pollen behaften, wie auch diesen auf den Narben absetzen. Sie beuten die Blumen aus, indem sie sich entweder auf ihnen oder in ihrer Nähe niederlassen, oder indem sie vor ihnen schwebend sich in der Luft halten; dabei berühren sie mit ihrem ganzen Körper oder mit einzelnen Teilen desselben den in der Blüte dargebotenen Pollen in einer solchen Weise, daß er sich entweder regellos oder aber an bestimmten Stellen des Körpers anheftet; besonders häufig werden sie am Rücken (nototrib), an den Flanken (pleurotrib) oder am Bauche (sternotrib) mit Pollen behaftet. Weitaus die wichtigsten Bestäubungsvermittler sind Angehörige verschiedener Abteilungen der Insekten, außerdem spielen auch gewisse Vögel in dieser Hinsicht eine bemerkenswerte Rolle, und endlich sind noch Schnecken, Milben und Fledermäuse in einem allerdings sehr geringfügigen Umfang als Bestäuber beobachtet worden.

7a) Die Insekten enthalten zahlreiche Gruppen, die in mehr oder weniger weitgehender Weise Blumennahrung aufnehmen, ohne daß sie aber zugleich als Bestäubungsvermittler tätig wären; dies gilt z. B. für zahlreiche Larven, die Blütenorgane zerfressen und verwüsten. Blumenbestäuber sind immer Insekten in ihrem vollkommenen Zustand (Imagines), die mit Flugvermögen begabt sind und zu den Abteilungen der Hautflügler (Hymenoptera), Schmetterlinge (Lepidoptera), Zweiflügler (Diptera) und Käfer (Koleoptera) gehören; gelegentliche Blütenbesucher aus den Gruppen der Hemiptera, Neuroptera und Orthoptera verdienen nur eine kurze Erwähnung.

Diese Insekten werden durch die in Abschnitt 6 geschilderten Anlockungs- und Genußmittel zum Besuche der Blumen veranlaßt. Ihre Anlockung erfolgt je nach der Beschaffenheit ihrer Sinnesorgane und je nach ihrer Klugheit bald vorzugsweise durch die Augenfälligkeit, bald mehr durch den Duft der Blüten, oder auch durch beides zusammen.

Die Augen, die bei den blumenbesuchenden Insekten in der Regel als Haupt- (Facetten-) und Nebenaugen ausgebildet sind, zeigen einen durchaus andersartigen Bau als die der Wirbeltiere und insbesondere des Menschen; dennoch dürften die Schauapparate der Blumen auf die Augen der Insekten einen ganz ähnlichen Eindruck machen wie auf die menschlichen, denn unter übrigens gleichen Bedingungen wird eine Blumenart um so reichlicher von Insekten aufgesucht, je augenfälliger sie für den Menschen ist, und umgekehrt. Doch ist gar nicht ausgeschlossen, daß für die Augen gewisser Insekten Lichtstrahlen wahrnehmbar sind, die das menschliche Auge nicht mehr empfindet. Im ganzen scheinen, soweit dies Versuche mit der Honigbiene ergeben haben, die Nebenaugen den allgemeinen Eindruck des hellen Lichtes zu vermitteln und die Insekten zum freien Flug in den unbeschränkten Luftraum hinaus zu befähigen, während die Hauptaugen nur ein beschränktes Gesichtsfeld haben, das sich im übrigen mit der Wölbung des Auges vergrößert, und zur Wahrnehmung in der Nähe dienen. Für die verschiedenen Blumenfarben besitzen die einzelnen Insektengruppen verschiedene Vorliebe, und die am meisten an Blumenbesuch angepaßten lassen sich durch eine gewisse Farbenwahl beim Besuch bestimmen.

Die Werkzeuge der Insekten zur Wahrnehmung von Düften sind ihre Fühler, welche an ihren Geißelgliedern die Geruchs-Sinnesorgane in Form von Haaren, Gruben und Membrankanälchen tragen. Während bei manchen Insekten, wie z. B. bei den Schmetterlingen, der Geruchssinn außerordentlich fein ausgebildet ist, scheint er bei anderen auf einer niedrigen Stufe zu stehen. Ferner sind die Geschmacksrichtungen der blumenbesuchenden Insekten bezüglich der Düfte recht verschieden, und ohne Zweifel lassen sich bestimmte Insektenarten durch spezifische Blumengerüche anlocken; dabei ist wiederum die Möglichkeit zu beachten, daß Insekten imstande sind, Düfte wahrzunehmen, die dem menschlichen Geruchssinn entgehen.

Im allgemeinen dürfte die Anlockung der Blumeninsekten auf weite Entfernungen meistens durch den Blütenduft erfolgen, dem eigentlichen Aufsuchen der Blumen in der Nähe aber der Gesichtssinn dienen, und schließlich werden an der Blüte selbst Form, Saftmale usw. den Weg zum Nektar weisen. Klügere Insekten lernen durch Uebung die verschiedenen Blüten und die in ihnen vorhandenen Nahrungsquellen immer genauer kennen und vermögen sie dann mit großer Sicherheit und Schnelligkeit auszubeuten. In letzterer Hinsicht ist natürlich die Ausbildung der Mundwerkzeuge (s. unten) von großer Bedeutung, wie weiterhin die Behaarung des Insektenkörpers ihn vorzugsweise geeignet macht, sich beim Blumenbesuch mit dem für die

Bestäubung erforderlichen Pollen zu behaften. Ein rasches Bewegungsvermögen endlich, welches den Blumenbesuchern gestattet, eine große Anzahl von Blüten in kurzer Zeit auszubeuten, ist nicht nur für diese Tiere, sondern auch für die Blumen von großem Nutzen.

Nach ihrer Ausrüstung und Wirksamkeit als Bestäubungsvermittler lassen sich (nach Loew) die blumenbesuchenden Insekten in folgende Stufen anordnen:

a) Dystrope, d. h. für die Bestäubung ungeeignete Besucher, welche entweder die Blütenteile zerfressen oder aussaugen, oder Gewohnheiten haben, die für den Vollzug der Bestäubung hinderlich sind. Hierher gehören viele Insektenlarven, Käfer, Blattläuse und wohl auch die Ameisen; zu ihnen muß man ferner einige ihrem Körperbau nach als Bestäuber durchaus geeignete Insekten rechnen, die aber nachträglich die Gewohnheit des Blumenverwüstens oder des Nektarstehlens angenommen haben, und die man als pseudodystrop bezeichnet. Vielfach haben sich an den Pflanzen Schutzmittel ausgebildet, um die Blüten gegen den unerwünschten Besuch dystroper Insekten zu sichern.

b) Allotrope, d. h. ungleichartig angepaßte Besucher von geringem Wert für die Bestäubung. Besondere Körperausrüstungen zur Ausbeutung der Blumen fehlen ihnen oder sind nur andeutungsweise vorhanden, insbesondere zeigen weder ihre Mundteile noch ihr Haarkleid entschiedene Anpassungen an die Blüten; neben den Blumenstoffen genießen sie auch andere Nahrung bisweilen in größerem Umfang und treten gelegentlich auch blumenverwüstend auf; ihr Orientierungsvermögen beim Blumenbesuch ist wenig entwickelt, ihre Bewegungen sind meist unregelmäßig; Lebhaftigkeit und Intensität des Blumenbesuches sind oft gering, erst bei den höher angepaßten Formen erscheinen sie gesteigert und die Bewegungen an den Blumen nehmen an Stetigkeit zu. Diese Stufe enthält die Mehrzahl der Koleoptera, die gelegentlich Blumen besuchenden Hemiptera, Neuroptera und Orthoptera, von den Dipteren die blumenbesuchenden Nematocera, die Stratiomyidae, Tabanidae, Leptidae, Therevidae, Empidae, Dolichopodidae und Muscidae, von den Hymenopteren die Entomophaga und Phytophaga, die Gattungen Vespa und Polistes, sowie die kurzrüsseligen Grabwespen (Crabronidae) und Goldwespen (Chrysididae).

c) Hemitrope, d. h. halb einseitig angepaßte Besucher von mittlerem Wert für die Bestäubung. Bei ihnen sind schon deutliche Ausrüstungen für erfolgreiche Blumenausnutzung erkennbar, aber noch viel schwächer ausgeprägt als auf der folgenden Stufe; alle sind regelmäßige Blumenbesucher und entweder nur als Imagines oder auch im Larvenzustand auf die Blumennahrung angewiesen; Mundteile und Haarkleid zeigen entschiedene, teilweise weitgehende Anpassungen an die besuchten Blumen. Zu ihnen gehören von den Dipteren die Conopidae, Bombyliidae und Syrphidae, von den Hymenopteren die langrüsseligen Grab- und Goldwespen, die Vespidae-Solitariae und die kurzrüsseligen Apidae, endlich die Lepidoptera mit Ausnahme der Sphingidae.

d) Eutrope, d. h. völlig einseitig angepaßte Besucher von höchstem Wert für die Bestäubung. Ihre Körpereinrichtungen und Gewohnheiten befähigen sie sowohl zu vollkommener Ausnutzung der Blumen wie auch zu erfolgreicher Bestäubung und insbesondere Fremdbestäubung in hohem Grade; die Mundteile sind außerordentlich verlängert, das Haarkleid meist sehr stark entwickelt und an die Blumen angepaßt; sie führen die Blumenbesuche mit größter Stetigkeit und Regelmäßigkeit der Bewegungen aus und sind von der Blumennahrung durchaus abhängig. Hierher gehören nur die langrüsseligen Apidae (mit zweigestaltigen Lippentastern) und von den Lepidoptera die Sphingidae.

Unter den hier aufgeführten Blumenbesuchern nehmen an Wichtigkeit in jeder Beziehung den ersten Rang ein

I. Die Hautflügler (Hymenoptera).

Etwa die Hälfte aller als Blumenbesucher beobachteten Insekten gehört der Artenzahl nach dieser Ordnung an. Dazu kommt noch, daß sich unter ihnen gerade die meisten eutropen und hemitropen Besucher befinden und viele von ihnen in größter Individuenzahl auftreten. Vorzugsweise gilt dies von der Familie der Immen (Apidae), die in den Bienen und Hummeln die wichtigsten aller Bestäubungsvermittler stellt. Sie sind nicht nur in ihrem Endstadium als weibliche, männliche und Arbeiter auf Blütennahrung angewiesen, sondern ziehen auch ihre Brut mit Pollen und Nektar auf, benötigen also große Mengen dieser Blütenstoffe und sind gezwungen, die Blüten mit größtem Eifer zu besuchen und auszubeuten.

Besonders die Honigbiene (Apis mellifica) spielt, obwohl bei uns nicht ursprünglich einheimisch, wegen ihrer Ausrüstung zum Einsammeln von Pollen und Nektar, der Schnelligkeit ihres Fluges, wegen ihres Eifers, ihrer trefflichen Sinneswerkzeuge und geistigen Fähigkeiten unter allen Bestäubungsvermittlern die erste Rolle. Hinsichtlich der Einbringung von Pollen gehört sie zu den sogenannten Schienensammlern, d. h. sie besitzt an ihren Hinterbeinen auf der Außenseite des vierten Gliedes, der Schiene, einen Pollensammelapparat (Fig. 22), der

aus einem Zaun langer, teils aufrechter teils einwärts gebogener Borstenhaare gebildet wird, worin mit Nektar angefeuchteter Pollen angehäuft werden kann. Der von der Biene aus den Antheren herausgefegte oder beim Blumenbesuch in ihrem Haarkleide haften bleibende Pollen wird von dem Insekt mittels der Fersenbürsten zusammengekehrt,

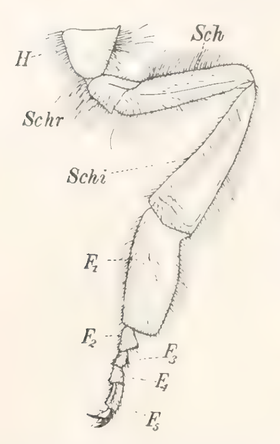


Fig. 22. Hinterbein einer Honigbiene mit dem Pollensammelapparat; H Hüfte, Schr Schenkelring, Sch Schenkel, Schi Schiene mit dem „Körbchen", F1 bis F5 die 5 Fußglieder. 8fach vergrößert.

am Munde mit Nektar befeuchtet und mit Hilfe der Vorder- und Mittelbeine in die beiden Pollensammelapparate verbracht, um im Bienenstock abgestreift zu werden. Die Mundwerkzeuge der Honigbiene legen sich auf ziemlich verwickelte Art zu einem sogenannten Rüssel (Fig. 23) in solcher Weise zusammen, daß das Tier damit beißen, saugen und Pflanzengewebe anbohren kann. Der Rüssel läßt sich bis zu einer Länge von 6 bis 6,5 mm ausstrecken, sowie beliebig verkürzen oder auch nach der Unterseite des Kopfes einschlagen, und setzt die Biene in den Stand, ebensowohl offen und flach liegenden wie auch halb verdeckten oder bis zu einer Tiefe von 6,5 mm in der Blüte geborgenen Nektar mit gleicher Bequemlichkeit aufzusaugen. Blaue und violette Blumen werden von der Honigbiene bevorzugt, grelles Gelb ist ihr wenig angenehm.

An sie schließen sich nahe die **Hummeln** (Bombus) an, deren zahlreiche Arten in ihrer körperlichen Ausrüstung zur Ausbeutung der Blumen den Bienen annähernd gleichkommen, sie durch bedeutendere Rüssellänge sogar übertreffen, aber hinsichtlich ihrer In-



Fig. 24. Rechtes Hinterbein eines Schenkelsammlers, Dasypoda plumipes. 7fach vergrößert. Bedeutung der Buchstaben wie in Figur 22.

telligenz und Lebensweise doch hinter der Honigbiene zurückstehen müssen. In noch höherem Maße als diese bevorzugen sie die violetten, blauen und roten Blumen vor den weißen und gelben. Pollensammelapparat und Rüssel der Hummeln sind denen der Honigbiene ähnlich, der Rüssel zeigt bei den einzelnen Arten bedeutende Längenunterschiede, von 9 bis 11 mm bei den Weibchen von Bombus terrestris bis zu 19 bis 21 mm bei denen von B. hortorum.

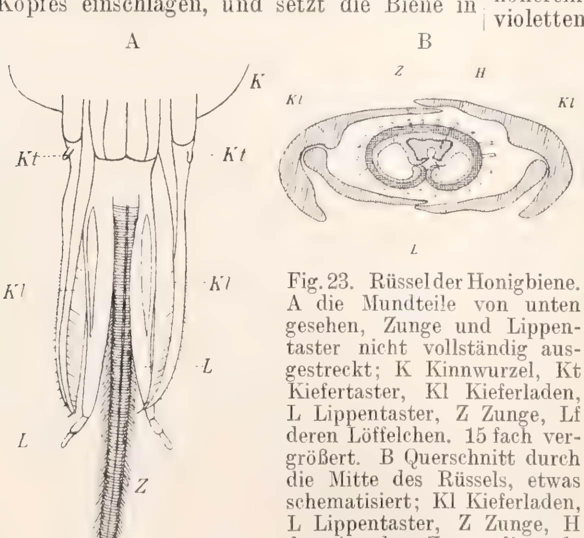


Fig. 23. Rüssel der Honigbiene. A die Mundteile von unten gesehen, Zunge und Lippentaster nicht vollständig ausgestreckt; K Kinnwurzel, Kt Kiefertaster, Kl Kieferladen, L Lippentaster, Z Zunge, Lf deren Löffelchen. 15 fach vergrößert. B Querschnitt durch die Mitte des Rüssels, etwas schematisiert; Kl Kieferladen, L Lippentaster, Z Zunge, H der in der Zunge liegende Hornstab. 75 fach vergrößert.

Unter den übrigen **Immen** kommt den gleichfalls zu den Schienensammlern gehörigen Gattungen Macropis, Anthophora, Eucera und Xylocopa ein höherer Rang als Bestäuber zu gegenüber den **Schenkelsammlern** (Dasypoda, Anthrena, Halictus, Sphecodes, Prosopis, Fig. 24) und den **Bauchsammlern** (Megachile, Osmia, Anthidium, Fig. 25). Die Schenkelsammler bilden mit ihren höchstens eine Länge von

7 mm erreichenden Rüsseln die kurzrüsseligen, die Schienen- und Bauchsammler die langrüsseligen Apiden. Letztere verschmähen bei ihren Besuchen Blumen mit offen liegendem Nektar und Blumengesellschaften, ziehen dagegen die Immenblumen vor. Bezüglich der Farben bevorzugen die kurzrüsseligen Hymenopteren noch in hohem Grade die hellfarbigen Blumen, bedeutend weniger ist das bei den kurzrüsseligen Apiden der Fall, und bei den langrüsseligen gibt sich eine deutliche Vorliebe für die dunklen (roten, violetten und blauen) Blumenfarben zu erkennen.

Eine weit zurückstehende Bedeutung als Bestäubungsvermittler haben die übrigen Familien der Hymenopteren, unter denen



Fig. 25. Hinterleib eines Bauchsammlers, Osmia spinulosa von unten und von der Seite gesehen. 7 fach vergrößert.

in dieser Hinsicht etwa die Crabronidae, Vespidae und Chrysididae von einigem Wert sind, die ebenfalls nicht selten Blumen besuchenden Ichneumonidae, Tenthredinidae und Pompilidae aber noch mehr in den Hintergrund treten.

II. Die Schmetterlinge (Lepidoptera) nehmen, was den Grad der Anpassung an Blumen anbelangt, unter allen Insekten die höchste Stufe ein, da ihre Mundteile durchaus auf die Gewinnung von Blumennektar eingerichtet sind. Ihr sogenannter Rüssel (Fig. 26) ist unter Verkümmerung der übrigen für die Insekten typischen Mundwerkzeuge aus den eigenartig umgebildeten Unterkiefern hervorgegangen und stellt ein langes dünnes, spiralig einrollbares Saugrohr dar, welches den Schmetterling befähigt, sowohl aus flachen und offenen wie aus eng- und tiefröhrigen Blumen Nektar zu gewinnen; am Rüsselende befindliche starre Spitzen können auch zum Aufritzen von saftigen Pflanzengeweben benützt werden. Die Länge des ausgestreckten Rüssels schwankt von 1 bis 4 mm bei den Bombycidae bis zu 80 mm bei den einheimischen, und selbst bis 250 mm bei ausländischen Sphingidae. Die genannte Familie zeichnet sich auch durch raschen Flug und große Blumenstetigkeit aus; außer ihr sind namentlich die Noctuiden als Bestäuber tätig, während den an Blumen sehr häufigen Tagfaltern wegen ihrer Unstetigkeit und mäßigen Geschwindigkeit nur ein geringer Wert zukommt. Die Anlockung der Schmetterlinge erfolgt nicht nur durch den Duft der Blumen, sondern auch durch deren Farbe; das ergibt sich daraus, daß von ihnen die roten, blauen und violetten Blumen beim Besuch vor den hellfarbigen bevorzugt werden. Ferner zeigen die Schmetterlinge Vorliebe für Falterblumen, verschmähen dagegen Blumen mit offen liegendem Nektar.

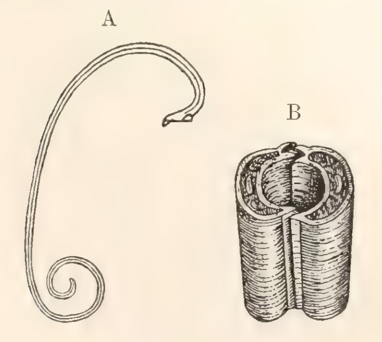


Fig. 26. Bau des Schmetterlingsrüssels. A eine der beiden von einem Unterkiefer gebildeten Rüsselhälften von Vanessa antiopa. 10 fach vergrößert. B Querschnitt aus dem Rüssel von Pieris brassicae. 60 fach vergrößert.

III. Die Zweiflügler (Diptera) enthalten mehrere Familien mit deutlich erkennbaren Anpassungen an den Blumenbesuch, außerdem auch zahlreiche Bestäuber aus anderen Familien, denen solche Anpassungen noch fehlen. Die blumentüchtigsten Familien sind die Syrphidae, Empidae, Bombyliidae und Conopidae mit Rüssellängen bis zu 12 mm, die sämtlich Nektar saugen, während die Syrphidae, die unter allen Dipteren am meisten für die Bestäubung der Blumen tätig sind, außerdem auch Pollen fressen. Diese langrüsseligen Dipteren bevorzugen bei ihren Besuchen die hellfarbigen Blumen in weniger hohem Grade als es die kurzrüsseligen tun. Auch in den kurzrüsseligen Familien der Muscidae und Stratiomyidae gibt es pollenfressende und nektarsaugende Arten, die als Bestäubungsvermittler von einiger Bedeutung sind. Der Saugapparat der blumenbesuchenden Dipteren (Fig. 27) ist ein im wesentlichen von der Ober- und der Innenlippe gebildeter und von der futteralförmigen Unterlippe umschlossener Rüssel, der nach vorn, aufwärts und abwärts gestreckt, und nach unten geklappt werden kann; bei den pollenfressenden Arten besitzt er an seinen Endklappen eine Vorrichtung zum Erfassen und Zermahlen der Pollenkörner und kann unter den Kopf zurückgezogen werden. Zugleich mit der Rüssellänge und der sonstigen körperlichen

Ausrüstung zur Gewinnung von Blumennahrung steigert sich bei den genannten Dipteren auch ihre Intelligenz und Geschicklichkeit im Auffinden von verstecktem Nektar; die kurzrüsseligen benehmen sich an den Blumen häufig dumm und ungeschickt. Im allgemeinen zeigen die blumenbesuchenden Dipteren Widerwillen gegen Immenblumen, die allotropen unter ihnen Vorliebe für Blumen mit offen liegendem, die hemitropen für solche mit teilweise geborgenem Nektar.

IV. Die Käfer (Koleoptera) finden sich auf vielen Blumenarten häufig als Besucher ein, sind aber meistens dystrop. Sie zeigen eine Vorliebe für Pollenblumen und Blumen mit offen liegendem Nektar, verschmähen dagegen Blumen mit völlig

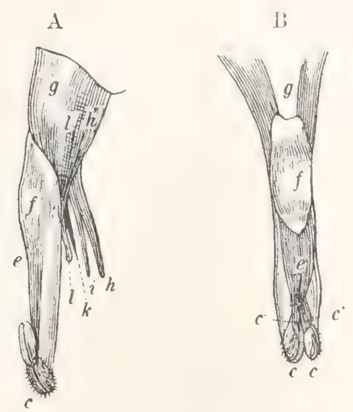


Fig. 27. Rüssel einer Schwebfliege, Eristalis tenax. A von der Seite, B von unten gesehen; 7 fach vergrößert. c Endklappen des Rüssels, e härteres Chitinstück an seiner Unterseite, f kontraktiler mittlerer Teil, g kontraktile Basis des Rüssels, h Oberlippe, i Innenlippe, k Unterkiefer, l Kiefertaster.

geborgenem Nektar, am meisten die Immen- und Falterblumen; sie bevorzugen hellfarbige, d. h. grünlichgelbe, gelbe und weiße Blumen. Auch ausgesprochene Blumenkäfer, wie die durch verschmälerten Halsschild, verlängerten Kopf und bärtige Unterkiefer ausgezeichneten Gattungen Clytus, Pachyta, Strangalia, Leptura, Grammoptera u. a. unter den Cerambycidae, ferner die schmalleibigen Oedemeridae, manche Cantharidae und zahlreiche ein ausschließliches Blumenleben führenden Arten der Telephoridae, Cistelidae, Mordellidae, Buprestidae, Phalacridae und Nitidulidae, haben doch keine hohe Anpassungsstufe an die Gewinnung von Blumennahrung erreicht. Nur aus Südamerika sind Arten der Gattung Nemognatha mit einer sehr weit gehenden Anpassung bekannt geworden: ihre Kieferaden haben sich außerordentlich verlängert, rinnenförmig ausgehöhlt und zu einem fadenförmigen, 12 mm langen Rüssel zusammengelegt, der wie ein Schmetterlingsrüssel zum Nektarsaugen gebraucht werden kann.

V. Die übrigen Insektenordnungen sind zwar auch unter den Blumenbesuchern vertreten, namentlich die Halbflügler (Hemiptera), doch zeigen sie weder erkennbare Anpassungen an die Blumen, noch sind sie als Bestäuber von merklichem Nutzen. Die winzigen, zu den Geradflüglern (Orthoptera) gerechneten Blasenfüße sind mit der Gattung Thrips und ihren Verwandten fast allgegenwärtige Gäste in den Blüten, schädigen diese zwar durch Fressen von Pollen, Benagen der Blütenorgane und Stehlen von Nektar, können aber durch Verschleppen von Pollenkörnern ab und zu Bestäubungen herbeiführen. Auch einige andere Orthopteren sowie vereinzelte Netzflügler (Neuropteren) sind Blumenbesucher.

7b) Die Vögel haben zwar unter den Bestäubungsvermittlern größere und kleinere Gruppen als Vertreter, aber solche, die ausschließlich von Blumennahrung lebten, kennt man nicht. Unser Wissen über die Rolle von Vögeln als Bestäuber ist noch ziemlich lückenhaft, doch lassen sie sich immerhin mit Rücksicht auf ihr Benehmen an den Blumen, auf ihre körperliche Ausrüstung zur Ausbeutung des Nektars und hinsichtlich ihres Wertes als Bestäubungsvermittler entsprechend den Blumeninsekten in drei Gruppen bringen.

a) Dystrop und allotrope. Es sind Blumenräuber und gelegentliche Honignäscher, die sehr verschiedenen Vogelfamilien angehören und von denen Blumenbesuche nur als Ausnahmefälle bekannt geworden sind. Die meisten Arten gehören der Verwandtschaftsreihe der Passeres mit vorwiegend insektivorer Lebensweise an, sie besuchen die Blumen weniger um des Nektars willen, als um den Blumeninsekten nachzustellen; nur bei den Dicaeidae und den amerikanischen Caerebidae kann man vielleicht schon vom Auftreten bestimmter Körpereinrichtungen zur Nektarausbeutung sprechen. Ferner gehören dieser Stufe die südasiatisch-australischen Trichoglossinae und die Sittacinae an, zwei Papageiengruppen, die sich vorherrschend von Pflanzenstoffen, darunter bisweilen auch von Pollen und Nektar nähren.

b) Hemitrope, die Honiglecker. Sie besitzen eine in beschränkter oder vollkommnerer Weise zum Honiglecken geeignete Zunge, zeigen Uebergänge von den allotropen Vögeln her und sind in ihren ausgeprägten Vertretern geschickte Bestäuber, die in der Regel unterhalb der auszubeutenden Blumen Platz nehmen oder sich an den Blüten oder in ihrer Nachbarschaft anklammern,

um den Nektar zu gewinnen. Die Honiglecker sind in den warmen Ländern der alten Welt, ferner in Australien, auf Neuseeland und ozeanischen Inseln verbreitet und bilden die Familien der Nectariniidae, Meliphagidae und Zosteropidae.

c) Eutrope, die Honigsauger. Sie werden durch die in den Tropen Amerikas und auf den benachbarten Inseln einheimischen Kolibris (Trochilidae) repräsentiert, sind durch den Bau ihrer zum Honigsaugen eingerichteten Zunge (Fig. 28) gekennzeichnet und dürften auch in anderer Hinsicht geschicktere und wirksamere Bestäubungsvermittler sein als die Honigvögel der alten Welt. Sie sind sehr gewandt im Fliegen und haben die Gewohnheit, nach Art der Sphingidae, an die

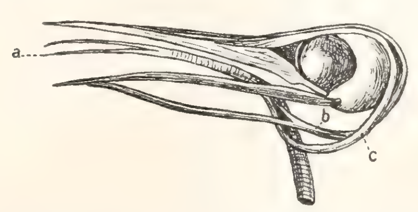


Fig. 28. Schädel und Zunge eines Kolibris. a die am Ende geteilte Zunge, b Muskel zum Zurückziehen, c zum Vorschieben der Zunge, natürliche Größe.

sie in Aussehen und Bewegungen überhaupt erinnern, die Blumen im Schweben zu besaugen. Von den bisher beobachteten Vogelbesuchen an Blumen entfallen 53,6% auf Kolibris gegen 38,6% von hemitropen Vögeln.

7c) Andere Tiere. Sonstige Blumenbesucher und Bestäubungsvermittler sind gegenüber den Insekten und Vögeln nur in vereinzelten Fällen von einiger Bedeutung. Beobachtet sind in dieser Hinsicht einige Milben, Springschwänze und andere kleine Wassertiere an den Lemnaceen, Nackt- und Gehäuseschnecken an Araceen, Lemnaceen u. a., Fledermäuse an einigen tropischen Pandanaceen, Caesalpiniaceen und Myrtaceen.

8. Die Blumenklassen. Die großen Unterschiede im Grade der Anpassung der Blumen an ihre Bestäubungsvermittler und in dem nach den vorliegenden Beobachtungen den einzelnen Blumenarten tatsächlich zuteil werdenden Besuch, die Verschiedenheiten der Blüteneinrichtungen, welche die Besucher zu bestimmten Bewegungen an den Blüten zwingen, gestatten uns, die Blumen in ökologische Gruppen zusammenzustellen, die man als Blumenklassen und deren Unterabteilungen bezeichnet hat.

Zuerst umschrieb F. Delpino, vornehmlich auf Grund des Baues und der Bestäubungseinrichtungen der Blüten, mit großem Scharfblick derartige Klassen, Typen und Formen von Blumen, die hier angeführt werden müssen, wenn sie auch nicht alle der späteren Kritik standgehalten haben.

1. Klasse. Gefängniseinrichtungen. Die geeigneten Bestäuber fallen in eine entweder von der Blütenhülle oder der Krone oder einer Blütenscheide gebildete Höhlung und bleiben dort mehr oder weniger lange eingesperrt.
a) Aristolochien-Typus mit einer mikromyiophilen und einer sapromyiophilen Form.
b) Cypripedium-Typus.
c) Coryanthes-Typus.

2. Klasse. Herbergeeinrichtungen. Die geeigneten Bestäuber lassen sich in der Blumenhöhlung nieder oder verbergen sich im Innern von Blütenständen und verweilen dort versteckt in der Herberge längere Zeit, können sie aber nach Belieben verlassen.
a) Aspidistra-Typus mit einer mikromyiophilen und einer sapromyiophilen Form.
b) Magnolien-Typus.
c) Hydrangea-Typus.
d) Feigen-Typus.

3. Klasse. Weitröhrige Einrichtungen. Die verwachsenblättrige Krone ist zu einer mehr oder weniger weiten Röhre ausgebildet, deren Ausmessungen der Form der Bestäuber entsprechen; diese dringen mit ihrem ganzen Körper oder dem größten Teil desselben in die Röhre ein und verweilen darin nur so lange, als zum Sammeln von Pollen und Nektar oder nur von Nektar erforderlich ist.
a) Datura-Typus.
b) Glocken-Typus.
c) Fingerhut-Typus mit einer sternotriben und einer nototriben Form.

4. Klasse. Hängende Einrichtungen. Die Blütenachse hängt abwärts, Krone, Kelch, Blütenhülle oder andere in radialer Richtung miteinander verschmolzene Organe bilden eine hängende nektarführende Röhre, in die Schnabel, Zunge oder Rüssel oder auch ein Teil des Körpers der Bestäuber eindringt.
a) Fuchsia-Typus.
b) Abutilon-Typus.

5. Klasse. Kleinmündige Einrichtungen. Sie unterscheiden sich nicht sehr von der vorigen, doch sind die Blütendimensionen kleiner; die Blütenachse ist horizontal anstatt hängend; Krone oder Kelch bilden eine bauchige und buckelige Röhre, in deren Höhlung Narben und Antheren völlig eingeschlossen sind; die Mündung der Röhre ist sehr eng und erlaubt nur dem Schnabel und der Zunge der Bestäuber den Zutritt.

6. Klasse. Lippenblumeneinrichtungen. Blüten symmetrisch, mit horizontaler oder abwärts geneigter Achse, immer mit Nektar; die Nektarien sind im Sinne der Blütenachse unten, die Antheren und Narben oben angeordnet, so daß eine nototribe Bestäubung erfolgen muß.
a) Lippenblüten-Typus mit der Helmform, Rachenform, Maskenform, Unterlippenform und einlippigen Form.
b) Aeschinanthus-Typus.
c) Veilchen-Typus.

7. Klasse. Schmetterlingsblumeneinrichtungen. Blüten symmetrisch mit hori-

zontaler, abwärts geneigter, bisweilen hängender Achse und mit sternotriber Bestäubung; die Teile sind im Vergleich zu einer Lippenblumeneinrichtung genau umgekehrt eingestellt.

a) Normaler oder kryptandrischer Schmetterlingsblumen-Typus mit der gewöhnlichen Form, der losschnellenden Form, der Nudelspritzenform und der Griffelbürstenform.

b) Gymnandrischer Typus.

c) Amaryllis- oder Rhododendron-Typus mit den Formen der eingeschlossenen und der hervorstehenden Staubblätter.

d) Melastomaceen-Typus.

e) Strelitzia-Typus.

8. Klasse. Röhrentragende und langröhrige Einrichtungen. Blütenachse horizontal, aufwärts oder abwärts geneigt, aber nie hängend; Blüten aktinomorph oder symmetrisch, mit eingeschlossenen oder hervorstehenden Staubblättern und Narben; das Hauptmerkmal liegt in dem Vorhandensein einer nektarführenden langen Röhre oder eines Spornes, die oft so dünn sind, daß nur ein Schmetterlingsrüssel zum Nektar vordringen kann.

a) Sporn-Typus.

b) Röhren-Typus.

9. Klasse. Umfliegungseinrichtungen. Ausschließlich für schwebende, nicht sitzende Bestäuber bestimmt, die um die Einzelblüte oder den Blütenstand herumschweben und sich dabei an der Rücken- oder Bauchseite bestäuben.

a) Methonica-Typus.

b) Stenocarpus-Typus.

c) Feuerlilien-Typus.

d) Proteaceen-Typus.

e) Callistachys-Typus.

10. Klasse. Umwanderungseinrichtungen. Aufrecht oder fast aufrecht und aktinomorph mit horizontaler Blütenausbreitung; der nie fehlende Nektar wird immer tiefer dargeboten als der Pollen; die Bestäuber (Apiden) wandern auf der Blütenfläche umher und erfahren dabei nototribe oder sternotribe Behaftung mit Pollen.

a) Passiflora-Typus.

b) Nigella-Typus.

c) Helianthus-Typus.

11. Klasse. Kriecheinrichtungen. Blütenstände mit eigentümlicher Flachheit der blühenden Oberfläche, auf der Schnecken oder Fliegen leicht umherkriechen können; Nektar ist nicht vorhanden, als Genußmittel wird Pollen oder ein Futtergewebe dargeboten.

a) Rhodea-Typus.

b) Anthurium-Typus.

c) Chrysosplenium-Typus.

12. Klasse. Anklammerungseinrichtungen. Die ziemlich kurzen und zusammenneigenden Staubblätter und Griffel bilden eine Gruppe, an der sich die Bestäuber anklammern, wenn sie Pollen und Nektar gewinnen wollen: dabei behaften sie sich an der Brust mit Pollen.

a) Borrago-Typus.

b) Verbascum-Typus.

13. Klasse. Offene regelmäßige Einrichtungen. Alle einfacheren Blumen, die in keine der vorhergehenden 12 Klassen gehören; Blüte weit geöffnet, mit leichtem Zugang zum Nektar, ohne besondere Anflugstellen, Saftmale und Safthalter.

1. Unterklasse. Grünblütige Einrichtungen: Blumen klein, gelblich, grünlich, gelblichweiß oder grünlichweiß, mit offen liegendem Nektar.

a) Rhamnus-Typus.

2. Unterklasse. Schwarzblütige Einrichtungen: Blumen schwärzlich oder bräunlich, sonst wie in der vorigen Unterklasse.

b) Uvaria-Typus.

c) Stapelia-Typus.

d) Schwarzblümchen-Typus.

3. Unterklasse. Vielblütige Einrichtungen: Kopfige Blütenstände von sehr verschiedenen Dimensionen.

e) Aster-Typus.

f) Scabiosen-Typus.

g) Trachelium-Typus.

4. Unterklasse. Schönblumige Einrichtungen: Blüten einfach, aktinomorph, ansehnlich, rosettenförmig.

h) Papaver-Typus.

i) Rosen-Typus.

k) Ranunculus-Typus.

5. Unterklasse. Kleinblumige Einrichtungen: Kleine weiße oder hellviolette Blumen mit sehr kurzen Kronblättern, auf sehr niederer ökologischer Stufe mit Neigung zur Selbstbestäubung.

Fruchtbarer als diese Delpinosche Klassifikation erwies sich der zuerst von H. Müller durchgeführte, die Beziehungen zwischen den Blumen und ihren Bestäubungsvermittlern klarer hervorhebende Gedanke, zur Aufstellung von Blumenklassen die Anpassungsstufen der Blumen an weitere oder engere Kreise von Besuchern zu verwenden. Im Verein mit den früher besprochenen

Windblütlern (Anemogamae — A)

Wasserblütlern (Hydrogamae — H)

sowie mit den

Habituellen Selbstbestäubern (S)

ergeben die folgenden Blumenklassen eine vollständige Uebersicht über alle bis jetzt bekannten Bestäubungseinrichtungen. Unter den Tierblütlern (Zoidiogamae — Z) lassen sich zunächst drei große Hauptgruppen erkennen, die den vorher (s. 7) aufgestellten Stufen der allotropen, hemitropen und eutropen Bestäubungsvermittler entsprechen und ebenso bezeichnet werden. Die beiden ersten Hauptgruppen enthalten Insektenblütler (Entomogamae — E), die letzte auch noch Vogelblütler (Ornithogamae — O).

8a) Allotrope Blumen sind solche, die den verschiedensten Insektenkategorien unbeschränkten Zutritt zum Blüteninnern und den darin enthaltenen Genußmitteln gewähren und hierbei gelegentlich bestäubt werden. Sie zeigen demgemäß nur die allgemeinen Merkmale der Entomogamie, aber keine erkennbaren Anpassungen an einen

bestimmten enger begrenzten Besucherkreis. Das schließt nicht aus, daß sich in dieser Gruppe eine Stufenfolge von einfacheren zu vervollkommneten Blüteneinrichtungen feststellen läßt. In der deutschen Flora sind etwa 41% aller Entomogamen allotrop.

1. Klasse. Pollenblumen — Po (Fig. 29), so genannt, weil sie keinen Nektar oder stellvertretende Stoffe enthalten, sondern den Besuchern nur Pollen als Genußmittel darbieten, im Gegensatz zu den Nektar enthaltenden Nektarblumen, Honigblumen oder Saftblumen. Auch sonst geben sie sich durch Einfachheit des Baues ihrer meist großen offenen Zwitterblüten, sowie durch leichte Erreichbarkeit des in der Regel reichlich hervorgebrachten Pollens als Blumen zu erkennen, die auf einer niederen Stufe der Entomogamie stehen. Von den Windblütlern, mit denen sie durch einige Uebergänge verbunden sind, unterscheiden sich die Pollenblumen durch ihre Augenfälligkeit, die etwas klebrige Beschaffenheit des Pollens und oft auch durch ausgeprägte Düfte. Die hauptsächlichsten Blumenfarben, besonders grelle, sind bei ihnen vertreten: weiß, gelb und rot am häufigsten, violett und blau weniger. Bisweilen zeigen die Schauapparate Farbenkontraste oder Zeichnungen, die den Saftmalen nektarhaltiger Blumen ähnlich sind, aber entweder nur zur Erhöhung der Augenfälligkeit der Blüten oder vielleicht auch zur Auffindung des Pollens dienen (Pollenmale). Die Blumen pflegen homogam, seltener schwach protogynisch zu sein; ihre Bestäubungsvermittler sind neben den an allen Blumenarten viel verkehrenden Honigbienen vorzugsweise kurzrüsselige Apiden und Schwebfliegen, auch pollensammelnde langrüsselige Apiden, verschiedene Fliegen und Käfer. Sie bewirken bei ihren Besuchen Selbst- und Fremdbestäubungen. In Deutschland umfaßt diese Blumenklasse etwa 8% der Insektenblütler, u. a. gehören zu den typischen Pollenblumen die Papaveraceen, Cistaceen, Rosen, Anemonen. Bemerkenswert ist bei einigen hierher gehörigen Blumen die sogenannte Heterantherie, d. h. das Auftreten von Staubblättern verschiedener Form und Funktion in derselben Blüte. Sie unterscheiden sich namentlich durch die Ausbildung ihrer Antheren; so dienen z. B. bei vielen Commelinaceen von den 6 Staubblättern der Blüte nur 3 mit normal ausgebildeten Antheren der Bestäubung, während die 3 anderen durch ihre Gestalt und Färbung die Aufmerksamkeit der Besucher auf sich lenken und ihnen ihren Pollen preisgeben. Bei der Gattung Cassia kommen in der Blüte außer den der Bestäubung dienenden und den für die Besucher Pollen als Nahrung spendenden noch solche verkümmerte Staubblätter vor, die von den Besuchern ergriffen und als Halt in der Blüte benutzt werden. In solchen Fällen unterscheidet man Befruchtungs-, Beköstigungs-, Anlockungs- und Anklammerungs-Staubblätter.

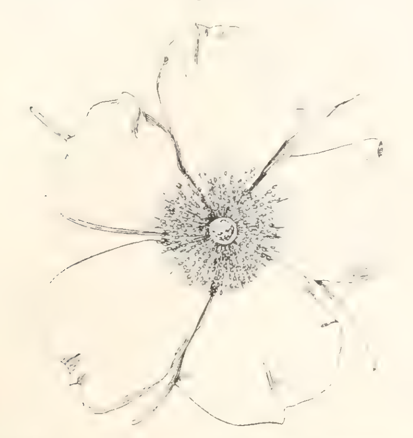


Fig. 29. Pollenblume. Blüte von Rosa carelica von oben gesehen. Natürliche Größe.

2. Klasse. Blumen mit allgemein zugänglichem Nektar — A (Fig. 30). Die Arten dieser in Deutschland mit etwa 10,5% der Entomogamen vertretenen Klasse zeichnen sich durch Einfachheit des Baues ihrer aktinomorphen offenen Blumen hinsichtlich der Zahl und Stellung der Blütenorgane, sowie durch leichte Zugänglichkeit des nektarhaltigen Blüteninnern aus. Der Nektar wird in der Regel von der Außenseite des Fruchtknotens oder von einem Polster auf seinem Scheitel, auch von seiner drüsigen Unterlage oder im flachen Blütengrunde abgesondert und dargeboten. Wegen der offenen Lage und allgemeinen Zugänglichkeit des Nektars sind Saftmale in den Blüten überflüssig. Als Besucher und Bestäuber ist eine große Menge der verschiedenartigsten Insekten tätig, mit der Einschränkung, daß die langrüsseligen Apiden und die

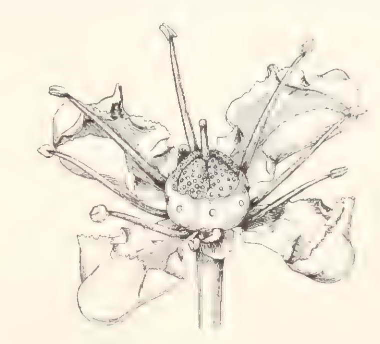


Fig. 30. Blüte von Ruta graveolens, schräg von oben gesehen. 3 fach vergrößert.

Schmetterlinge den weniger blumentüchtigen kurzrüsseligen Insekten das Feld überlassen. In den zwitterigen Blüten wird Fremdbestäubung nicht selten durch die gegenseitige Stellung der Geschlechtsorgane begünstigt, in anderen Fällen durch ausgesprochene Protandrie (Ruta, Tilia, Rubiaceae, Umbelliferae), seltener durch Heterostylie (Fagopyrum). Auch Trennung der Geschlechter kommt vor, und zwar Scheinzwitterigkeit (Acer), Andromonöcie (Galium, Umbelliferae), selten Einhäusigkeit (Buxus) oder Zweihäusigkeit (Arctopus, Rhamnus). Häufig sind in dieser Blumenklasse weiße Blüten, daneben finden sich besonders grünlichgelbe und gelbe, seltener rote oder blaue Blütenfarben.

3. Klasse. Blumen mit teilweise verborgenem Nektar — AB (Fig. 31). In dieser an Arten besonders reichen Blumen-

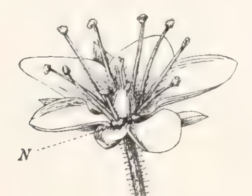


Fig. 31. Blüte von Alsine verna, schräg von oben gesehen, bei N 2 Nektarien sichtbar. 4 fach vergrößert.

klasse, der bei uns 22,5% der Entomogamen angehören, wird zwar auch der Nektar noch in geringerer Tiefe dargeboten, aber er ist durch Haare, Schuppen oder andere Blütenteile verdeckt oder in Vertiefungen verborgen, so daß er von außen nicht ohne weiteres und nur unter besonders günstigen Umständen gesehen werden kann. Die Blumen sind in der Regel aktinomorph gebaut, ohne Saftmale oder mit auf der Krone gleichmäßig verteilten Strichen oder leichten Farbenkontrasten. Die vorherrschenden Farben sind intensives Gelb und Weiß, während das in der Klasse A häufige schmutzige Gelbgrün kaum vorkommt, Rosa und Dunkelrot selten sind. Besucht werden die weißen Blumen dieser Klasse hauptsächlich von Fliegen, die gelben außerdem noch von kurzrüsseligen Apiden; viele kurzrüsseligen Insekten, denen der wenig tief geborgene Nektar wohl zugänglich wäre, werden von seinem Genuß ausgeschlossen, weil sie ihn in der Blüte nicht bemerken. Die meisten hierher gehörigen Blüten sind zwitterig, aber nicht selten deutlich (viele Rosaceen) oder schwach protogynisch (Cruciferae) oder protandrisch (Crassulaceae, Alsineae); doch findet sich auch die Ausbildung männlicher und weiblicher neben den zwitterigen, sowie völlige Geschlechtertrennung bei der zweihäusigen Gattung Salix.

8b) Hemitrope Blumen schließen durch tiefere Bergung und infolgedessen erschwerte Zugänglichkeit des Nektars zahlreiche kurzrüsselige Besucher von dessen Genuß aus, ohne aber bereits deutliche Anpassungen an die verhältnismäßig häufiger als Bestäuber auftretenden langrüsseligen Insekten erkennen zu lassen. Die Zahl der Arten in dieser Gruppe beträgt bei uns etwa 27,5% der Insektenblütler.

4. Klasse. Blumen mit vollständig geborgenem Nektar—B (Fig. 32). Die Blumen dieser in Deutschland mit ca. 8,5%

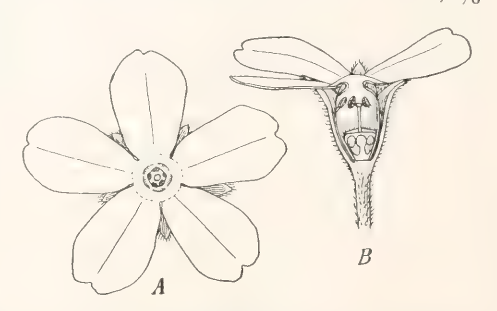


Fig. 32. Androsace obtusifolia. A Blüte von oben, B im Längsschnitt. 3 fach vergrößert.

der Entomogamen vertretenen Klasse zeigen neben aktinomorphen Blütenhüllen, unter denen die offenen und flachen durch glockig vertiefte oder zu Röhren zusammenschließende ersetzt werden, vielfach auch symmetrische, seitlich gerichtete Formen, und die rote und blaue Blütenfarbe gewinnt das Uebergewicht über die weiße und gelbe. Entsprechend der tieferen Bergung und schwierigeren Auffindbarkeit des Nektars pflegen deutlich ausgeprägte Saftmale vorhanden zu sein. Kleinere und wenig augenfällige Blumen, auch solche denen wegen ihres Standortes geringerer Insektenbesuch zuteil wird, wahren sich durch Homogamie die Möglichkeit der Selbstbestäubung, sonst wird diese durch die gegenseitige Stellung der Geschlechtsorgane und Herkogamie, oder durch Dichogamie oder Eingeschlechtigkeit der Blüten verhindert. Trotz Homogamie wird bei den besonders in dieser Blumenklasse vertretenen Heterostylen der Eintritt und die Wirkung von Selbstbestäubung, ja selbst von illegitimen Kreuzungen zugunsten der legitimen, die immer xenogam sind, zurückgedrängt; sowohl dimorphe (Forsythia, Hottonia, Menyanthes, Limnanthemum, Plumbago, Linum) wie trimorphe Heterostylie (Lythrum) ist vertreten. Besonders häufige Verwendung findet zur Begünstigung der Fremdbestäubung die Protandrie (z. B. Geranium, Epilobium, Malva, viele Labiatae), oft mit Platzwechsel der beiderlei Bestäubungsorgane, weniger die Protogynie (Helleborus, Aesculus). Eingeschlechtige Blüten finden sich neben zwitterigen in der Form der Gynomonöcie, Gynodiöcie und

Trimonöcie (Aesculus). Als Bestäubungsvermittler sind noch sehr verschiedene Insektengruppen tätig, indessen unter mehr oder weniger weitgehendem Ausschluß der kurzrüsseligen.

5. Klasse. Blumengesellschaften mit völlig geborgenem Nektar — B' (Fig. 33). Unter Blumengesellschaften im Sinne der Blütenökologie versteht man kopfige Blütenstände aus zahlreichen, meist kleinen Blumen mit völliger Nektarbergung, bei denen die dicht gedrängt stehenden Einzelblüten zum Zweck der Ausbildung des Schauapparates und häufig auch bezüglich der Entwickelung der Geschlechtsorgane in den Dienst der Gesellschaft treten und entsprechende Umbildungen erfahren. Die Blumengesellschaft wirkt dem Aussehen nach wie ein einfache Blume; der Insektenbesuch hängt derart von der Blütenfarbe ab, daß die weißen und gelben Blumengesellschaften mehr einen gemischten Besuch erfahren, die roten, blauen und violetten von den einsichtigeren und langrüsseligen Besuchern bevorzugt werden. Bei den zwitterigen Einzelblüten der Blumengesellschaften ist in der Regel Fremdbestäubung durch ausgeprägte Protandrie begünstigt, auch Polygamie tritt in verschiedenen Formen nicht selten auf. In der deutschen Flora machen die Arten dieser Blumenklasse etwa 19% der Entomogamen aus; sie finden sich in der vollkommensten Ausbildung in der Familie der Dipsacaceae, besonders aber der Compositae. Diese nach Artenzahl größte Familie der Blütenpflanzen besitzt in der Zusammenordnung zahlreicher Blüten zu einer Gesellschaft, die sehr augenfällig wird, massenhafte Insekten anlockt und von den Besuchern in kürzester Zeit befruchtet werden kann, in der starken Protandrie der Zwitterblüten und in mancherlei besonderen Einrichtungen so vortreffliche Mittel zur sicheren Herbeiführung von Fremdbestäubungen, ohne zugleich die Möglichkeit der Selbstbestäubung aufgegeben zu haben, daß ihre Blüteneinrichtung zu den vollkommensten des Pflanzenreichs gerechnet werden muß. Auch die mannigfachsten Formen der Polygamie haben sich in dieser Familie ausgebildet, und häufig ist die Erscheinung, daß die im Umfang des Kopfes stehenden Blüten (Strahlblüten) geschlechtslos geworden sind und als einzige Aufgabe die Erhöhung der Augenfälligkeit der

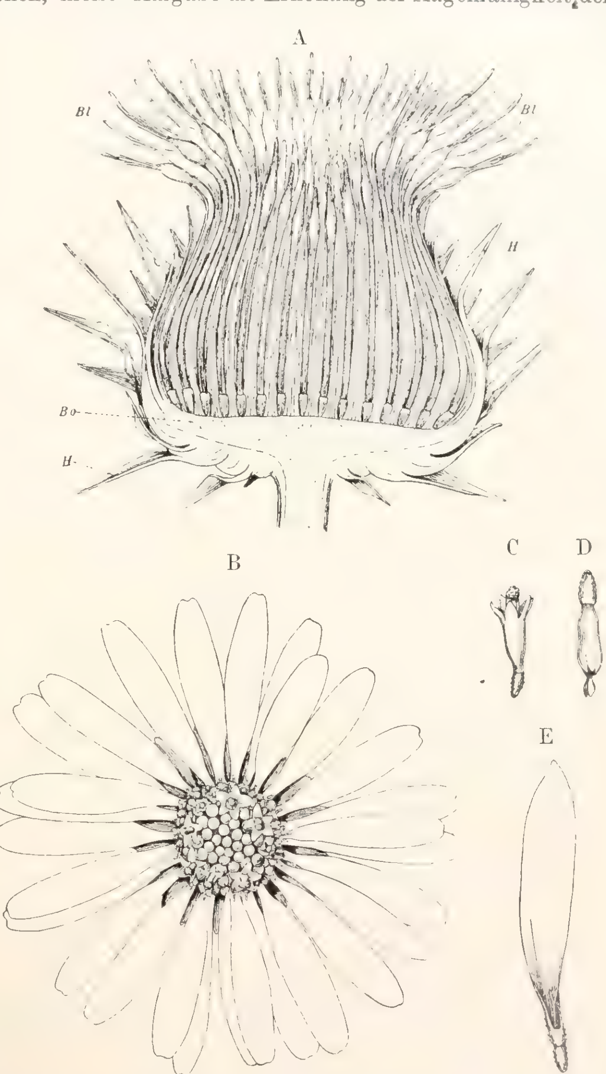


Fig. 33. Blumengesellschaft der Compositen. A Blütenkopf von Cynara cardunculus im Längsschnitt; H Blätter des Hüllkelches, Bo Blütenboden, auf dem die Einzelblüten Bl eingefügt sind. $^3/_4$ natürliche Größe. B ausgebreiteter Blütenkopf von Bellis perennis, von oben gesehen; in der Mitte glöckchenförmige Scheibenblüten, am Rande zungenförmige Strahlblüten. 3 fach vergrößert. C und D zwitterige Scheibenblüte im früheren männlichen und im späteren weiblichen Zustand. 4 fach vergrößert. E weibliche Strahlblüte. 4 fach vergrößert.

Blumengesellschaft beibehalten haben. In der Familie der Compositae läßt sich eine Entwicklungsreihe für die Blumengesellschaften feststellen, die von ursprünglicheren Formen mit lauter gleichgestalteten Zwitterblüten zu solchen führt, bei denen durch fortschreitende Arbeitsteilung die Verrichtungen der Pollenproduktion, der Samenbildung, der Nektarabsonderung und der Herbeiführung von Augenfälligkeit immer mehr auf verschiedene Blüten der Gesellschaft verteilt werden.

8c) Eutrope Blumen, d. h. solche, die sich in einseitiger Weise der Bestäubung durch bestimmte größere oder kleinere Gruppen von besuchenden Tieren unter mehr oder weniger vollständigem Ausschluß der übrigen angepaßt haben; sie werden deshalb nach den zuständigen Bestäubungsvermittlern benannt.

6. Klasse. Dipterenblumen — D. Hier werden verschiedene Blüten zusammengefaßt, die nach ihrem Bau allein sich den Klassen A und AB einreihen würden, tatsächlich aber im wesentlichen von Dipteren bestäubt werden; je nach der Bestäuberkategorie weichen sie in ihrer Einrichtung untereinander erheblich ab. Man kann im ganzen etwa 2% der in Deutschland einheimischen Entomogamen zu ihnen rechnen.

1. Gruppe. Offene zierliche Fliegenblumen (Schwebfliegenblumen. Fig. 34) sind völlig oder fast aktinomorph, mit leicht

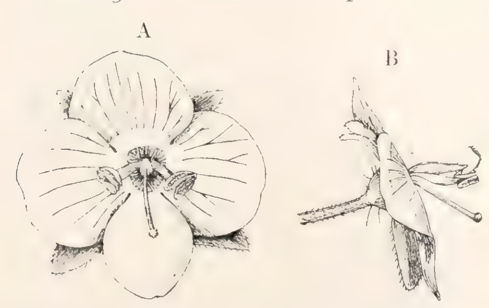


Fig. 34. Blüte von Veronica Tournefortii. A von vorn, B von der Seite gesehen. 4 fach vergrößert.

zugänglichem Nektar, und müssen etwas besonders Anziehendes für Schwebfliegen haben, da sie fast ausschließlich von solchen besucht werden. Sie zeigen eine weiße, hellrötliche oder himmelblaue Farbe, häufig zierliche Saftmale in Form von Strichen oder Punkten, und sind bald homogame, bald dichogame und dann meist protandrische Zwitterblüten (Veronica, Circaea, weiß blühende Saxifraga-Arten).

2. Gruppe. Trübfarbige Fliegenblumen (Fig. 35) mit trübgelber, grünlichgelber, bräunlicher, fahler oder grauer Farbe werden von einer großen Menge verschiedener Fliegenarten besucht. Im besonderen hat man die mißfarbigen übelriechenden unter ihnen als Ekelblumen, die dunkelpurpurnen oder schwarzbräunlichen mit Kadavergeruch als Aasfliegenblumen bezeichnet. Häufig ist Protandrie (Hedera, Saxifraga-Arten) und Protogynie (Tozzia), wenn man zu diesem Typus auch die eigentümlichen Blütenstände der Euphorbia-Arten rechnet, die wie einfache Blüten aussehen und fungieren. Weiter ausgebildet erscheinen diese Einrichtungen bei einigen Araceae von einfacherem Bau, bei denen die Aufgabe des Schauapparates dem Hüllblatt zufällt, welches den kolbenförmigen, aus zwitterigen oder eingeschlechtigen Blüten bestehenden Blütenstand am Grunde umgibt (Calla, Monstera, Anthurium) und welches durch Größe, Gestalt und Färbung oft ein

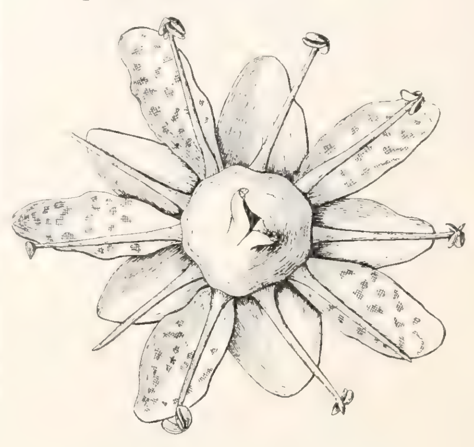


Fig. 35. Blüte von Saxifraga aizoides von von oben gesehen. 4 fach vergrößert.

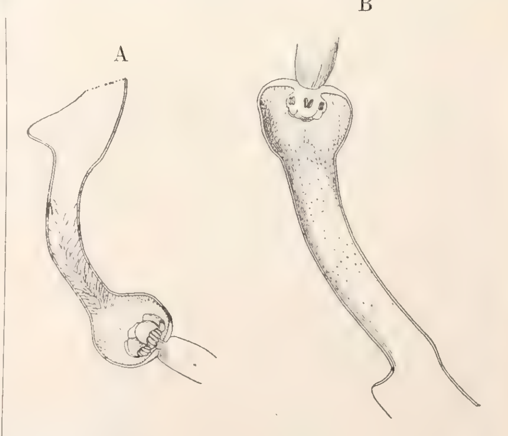


Fig. 36. Unterer Teil der Blüte von Aristolochia clematitis, längs durchschnitten. 2fach vergrößert. A jüngere, aufwärts gerichtete Blüte mit abwärts stehenden Reusenhaaren im Innern der Blütenröhre. B ältere, abwärts geneigte Blüte, in deren Röhre die Reusenhaare zusammengetrocknet sind.

höchst sonderbares Aussehen annimmt. Diese Araceen-Blütenstände zeigen Uebergänge zur folgenden Gruppe.

3. Gruppe. Kesselfallenblumen (Fig. 36). Das sind Blütenstände (Araceae) oder Einzelblüten (Aristolochia), bei denen das Hüllblatt oder die Blütenhülle so gestaltet ist, daß ein unterer Teil davon einen im Innern die Bestäubungsorgane enthaltenden Kessel bildet, dessen Eingang so eingerichtet ist, daß er den Bestäubungsvermittlern den Zutritt gestattet, sie aber im Kessel so lange als Gefangene zurückhält, bis sie die Bestäubung vollzogen haben, die wegen der Dichogamie der Blüten in der Regel xenogam ist; nachher öffnet sich der Ausweg aus dem Kessel, sodaß die Bestäuber ins Freie gelangen können. In der Regel sind es kleine Mückenarten oder Aasfliegen, welche die Bestäubung vollziehen.

4. Gruppe. Fliegen-Klemmfallenblumen (Fig. 37). Hierunter versteht man Einrichtungen, durch die besuchende Fliegen im ganzen oder an bestimmten Körperteilen festgeklemmt und zu Bewegungen gezwun-

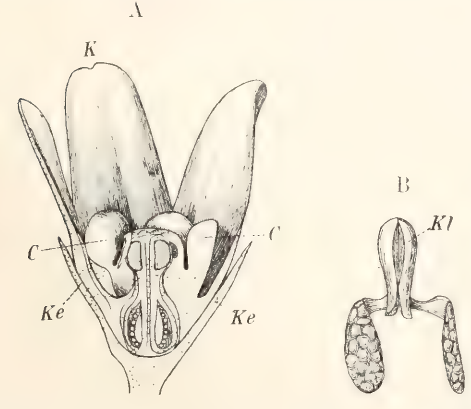


Fig. 37. Vincetoxicum officinale. A Blüte im Längsschnitt; Ke Kelch, K Krone, C Krönchen mit den Nektarbehältern. 8 fach vergrößert. B zwei Pollinien mit ihrem Klemmkörper Kl, das linke von der breiten, das rechte von der schmalen Seite gesehen. 50 fach vergrößert.

gen werden, welche die Bestäubung zur Folge haben. Das Festhalten der Insekten geschieht in einfacheren Fällen durch schräg gestellte Borsten, die ein Einkriechen, aber keine Rückwärtsbewegung gestatten (Pinguicula alpina), in anderen durch die Ausbildung komplizierter Klemmapparate, die in fester Verbindung mit den zu Pollinien verbundenen Pollenkörnern sogenannte Pollinarien bilden, sich den Extremitäten der Besucher anheften und von diesen zum Vollzug der Bestäubung verwendet werden (Vincetoxicum, Apocynum). Je nach der Struktur der meistens weißen Blumen werden größere oder kleinere Fliegen in der Falle eingeklemmt.

5. Gruppe. Kessel-Klemmfallenblumen stellen eine Kombination der beiden vorhergehenden Typen dar, wobei im Innern eines Kessels sich eine Klemmfalleneinrichtung vorfindet (Ceropegia).

6. Gruppe. Fliegen-Täuschblumen (Fig. 38) nennt man solche Dipterenblumen, deren Aussehen auf das Vorhandensein reich-

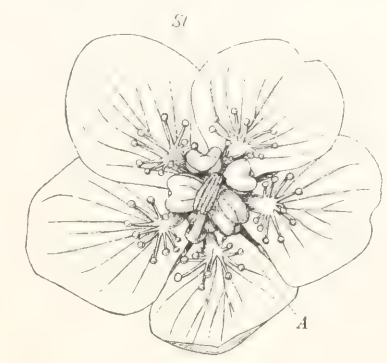


Fig. 38. Insekten-Täuschblume Parnassia palustris; Blüte von oben gesehen; von den 5 Antheren ist eine (A) geöffnet, St die Staminodien. 3 fach vergrößert.

licher Nahrung, besonders von Nektar, schließen läßt, die deshalb wenig intelligente Musciden zum Besuch verlocken, ihnen aber wenig oder gar keine Genußmittel darbieten (Scheinsaftblumen Sprengels). So sind bei Parnassia palustris die 5 gelbgrünen, in der weißen Blüte stehenden Staminodien, die in Stieldrüsen mit kugeligen Köpfchen auslaufen, lediglich Scheinnektarien, während Nektar nur in geringer Menge an einer bestimmten Stelle ihrer Oberfläche abgesondert wird. Bei Paris übernimmt in der grünlichen Blume der schwarzpurpurne glänzende, von 4 purpurnen Griffeln gekrönte Fruchtknoten die Anlockung von fäulnisliebenden Fliegen.

7. Klasse. Hymenopterenblumen — H. Sie sind mit 24,5% der Entomogamen in der deutschen Flora weitaus die größte unter den eutropen Blumenklassen, wie es auch der wichtigen Stellung der Hymenopteren unter den Blumenbesuchern entspricht. Gestalt und Farbe sind bei den Hymenopterenblumen von größter Mannigfaltigkeit, doch überwiegen zygomorph gebaute Blüten mit eingeschlossenen Bestäubungsorganen, und bei den an langrüsseligere Hymenopteren angepaßten die weniger grellen Farben, wie rot, blau und violett. Die Blütenmechanik ist oft so verwickelt, Nektar und Pollen so versteckt, daß nur besonders intelligente Insekten die Blumen ausbeuten und bestäuben können.

Welche Familien, Gattungen und Arten der Hymenopteren bei den einzelnen Blumenarten als normale Bestäuber tätig sind, das hängt hauptsächlich von der Tiefe der Nektarbergung und der Rüssellänge der Insekten ab. So haben sich verschiedene Gruppen und Typen ausgebildet, deren wichtigste und artenreichste in der folgenden Unterklasse enthalten sind.

1. Unterklasse. Immenblumen (Bienenblumen) — Hb. Unter den Blumen dieser Kategorie werden oft die Bienenblumen im engeren Sinne von den Hummelblumen (Hh) unterschieden, allein da sie unmerklich ineinander übergehen und von den Hummeln auch die Bienenblumen ausgebeutet werden, so ist es richtiger, jene Unterscheidung fallen zu lassen und eine Einteilung der Immenblumen vorzunehmen, die sich in vielen Punkten an die Klassifikation von Delpino anschließt.

1. Gruppe. Engröhrige Immenblumen (Fig. 39) haben meist einen einfachen aktinomorphen Bau und enthalten den Nektar in einer Röhre von so geringer Weite, daß die



Fig. 39. Blüte von Anchusa italica im Längsschnitt. Natürliche Größe.

Besucher nur den Rüssel oder höchstens noch den Kopf in sie einführen können, dabei aber von einer Länge, welche den Apiden die Erreichung des Nektars noch gestattet. Außer einigen monokotyledonischen Blüten gehören zahlreiche Sympetalen aus den Familien der Borraginaceen und Primulaceen hierher, bei denen die Blumenröhre von der Krone gebildet wird. Die Blüten dieser Gruppe sind zwitterig, meist homogam mit Bevorzugung von Fremdbestäubung infolge der gegenseitigen Stellung der Geschlechtsorgane oder infolge von dimorpher Heterostylie (Pulmonaria, Primula, Gregoria), und werden von kurz- oder langrüsseligen Apiden, manchmal vorzugsweise von bestimmten Arten bestäubt.

2. Gruppe. Weitröhrige Immenblumen (Fig. 40). Die Blütenhüllen bilden durch Verwachsung oder dichtes Aneinanderlegen ihrer Blätter große, den Verhältnissen der Apiden entsprechende Behältnisse, in welche die Besucher mit ihrem ganzen Körper oder mit dem größten Teile davon eindringen. Die Blüten sind fast immer zwitterig und dann meistens dichogam, seltener eingeschlechtig (Cucurbitaceae) mit größeren männlichen und kleineren weiblichen Blumen.

a) Trichteriger Typus, mit aufrecht stehenden, trichter-, keulen- oder glockenförmigen, großen aktinomorphen Blumen (Colchicum, Narcissus pseudonarcissus, Gentiana acaulis), die bisweilen mehrere getrennte Nektarzugänge im Blütengrunde besitzen (Revolverblüten Kerners).

b) Schwertlilien-Typus, durch Iris und ihre nächsten Verwandten vertreten, bei denen die ebenfalls aktinomorphe Blüte 3 große, voneinander getrennte Eingänge besitzt, die den Körper der besuchenden Hummeln u. a. aufnehmen.



Fig. 40. Blüte von Gentiana acaulis im Längsschnitt. Natürliche Größe.

c) Glockiger Typus, mit herabhängenden, also ihren Eingang nach unten wendenden glockenförmigen aktinomorphen Blumen, bei denen die Blütenglocke entweder durch dichtes Zusammenlegen getrennter Blütenhüllblätter (Fritillaria) oder durch Verwachsung der Kronblätter (Campanulaceae) gebildet wird. Fremdbestäubung ist meistens durch ausgeprägte Protandrie, seltener durch Protogynie der Zwitterblüten begünstigt.

d) Fingerhut-Typus. Er umfaßt schräg abwärts geneigte weitröhrige Immenblumen von zygomorphem Bau und mit einseitiger Anordnung der Bestäubungsorgane entweder an der oberen (Digitalis) oder unteren Fläche (Cobaea) der Innenseite der Krone. Die durch Hummeln vermittelte nototribe oder sternotribe Bestäubung ist wegen der Dichogamie der Zwitterblüten in der Regel allogam.

e) Aconitum-Typus. Er unterscheidet sich vom vorigen besonders durch die aufrechte Stellung der Blumen, in denen die oberen Teile der Blütenhüllen ein helmförmiges Dach bilden, und wird neben der in weitestgehender Weise an die Bestäubung durch Hummeln angepaßten Gattung Aconitum mit sternotriber Pollenaufladung auch durch die von verschiedenen langrüsseligen Apiden besuchte Gattung Gladiolus mit nototriber Bestäubung repräsentiert, die zugleich beide in ausgezeichneter Weise protandrisch sind.

3. Gruppe. Lippenblumen (Fig. 41).

Die im allgemeinen wagerecht oder schräg aufwärts gestellten Blumen sind immer zygomorph und zeigen im vorderen Teil ihrer Blütenhüllen, die verwachsenblätterig oder freiblätterig sein können, 2 große, seitlich symmetrisch zueinander angeordnete Einschnitte, durch welche eine oben stehende



Fig. 41. Blüte von Lamium album im Längsschnitt. 3 fach vergrößert.

helmartige Oberlippe und eine nach unten fallende Unterlippe voneinander getrennt werden. Die Oberlippe überdacht die Bestäubungsorgane, die von den besuchenden Apiden nur mit dem vorderen Körperteil nototrib berührt werden, die Unterlippe dient diesen als Anflugplatz und trägt die Saftmale. Oft erschwert oder verhindert die gegenseitige Stellung der Geschlechtsorgane den Eintritt von Autogamie, häufig sind protandrische, seltener protogynische Zwitterblüten, neben ihnen bilden sich auch männliche und weibliche aus.

a) Eigentlicher Lippentypus (Helmtypus). Er wird durch eine große Anzahl von Labiatae, Scrophulariaceae und verwandten Sympetalen vertreten, welche zweilippige offene Kronen und meist 2 Paare, seltener nur 1 Paar von Staubblättern besitzen, die frei unter der Oberlippe liegen.

b) Rachenförmiger Typus, vorzugsweise bei Scrophulariaceen ausgebildet, unterscheidet sich vom vorigen dadurch, daß die Oberlippe die in ihr liegenden Antheren fest einschließt und dieser Verschluß erst durch die besuchenden Hummeln so weit gelockert wird, daß die Insekten mit Pollen bestreut werden können (Melampyrum, Pedicularis).

c) Maskenförmiger Typus, ebenfalls hauptsächlich in der Familie der Scrophulariaceen vertreten und dadurch gekennzeichnet, daß die Unterlippe gegen die Oberlippe vorgewölbt und ihr elastisch so fest angepreßt ist, daß der Blüteneingang völlig verschlossen wird und nur von kräftigen Apiden geöffnet werden kann (Linaria, Antirrhinum).

d) Orchideen-Typus, mit oberständiger freiblätteriger Blütenhülle, an der durch 3 oder 5 oben stehende Blätter ein helmartiges Organ gebildet wird, während ein oft sehr auffallend gestaltetes unteres und inneres Blütenhüllblatt die Unterlippe darstellt. Hierzu kommt die Ausbildung einer durch Verwachsung eines kurzen Griffels und seiner Narbe mit dem einen oder den 2 in der Blüte vorhandenen Staubblättern entstandenen Geschlechtssäule (Gynostemium) und die Umformung der Anthereninhalte zu kompliziert gebauten Pollinarien — Eigentümlichkeiten, die Blüteneinrichtungen mit sich bringen, welche zu den verwickeltsten und sonderbarsten des ganzen Pflanzenreiches gehören. Insektenhilfe ist zur Bestäubung fast ausnahmslos erforderlich.

e) Veilchen-Typus, mit fünfblättriger unterständiger Krone, an der das unterste, an seinem Grunde in einen Sporn ausgehende Blatt der Unterlippe vergleichbar ist, und die Oberlippe durch die oberen 2 oder 4 aufrechten oder nach hinten gebogenen Kronblätter ersetzt wird. Lage und Tiefe des Safthalters, sowie die gegenseitige Stellung der Geschlechtsorgane bedingen es, daß bei den meisten Violaarten die Bestäubung nur von kurz- oder langrüsseligen Apiden vollzogen werden kann.

4. Gruppe. Schmetterlingsförmige Immenblumen (Fig. 42). Sie kommen vorzugsweise in der Familie der Papilionaceae, in etwas abweichender Form auch noch bei einigen anderen, ihnen systematisch nicht nahe stehenden Familien vor und bilden gewissermaßen die Umkehrung einer Lippenblume. Denn in der ebenfalls zygomorphen Blüte, die in der Regel horizontal steht, sind die Geschlechtsorgane in dem unteren, zu einem kapuzenartigen oder taschenähnlichen Behältnis geformten Blütenabschnitt eingeschlossen, so daß durch die besuchenden Apiden eine sternotribe Pollenübertragung stattfinden muß; dagegen übernimmt der obere Teil der Krone vorzugsweise die Anlockung der Insekten und trägt gewöhnlich die Saftmale. Bei eintretendem Insektenbesuch werden Pollen und Narbe so weit aus ihrem Verschluß befreit, daß Allogamie eintreten kann. Spontane Selbstbestäubung ist häufig durch die Stellung der Geschlechtsorgane oder durch Protandrie verhindert oder erschwert, in anderen Fällen ist sie möglich oder selbst unvermeidlich, aber ohne Erfolg für die Befruchtung. Von den verschiedenen Typen dieser Immenblumengruppe finden sich die 4 zuerst aufgeführten bei der Familie der Papilionaceen, deren Krone aus einer

hinten stehenden Fahne, zwei seitlichen Flügeln und einem aus zwei Blättern mehr oder weniger weit zusammengewachsenen Schiffchen besteht; letzteres umschließt die Geschlechtsorgane, nämlich 10 Staubblätter, deren Staubfäden entweder sämtlich zu einer geschlossenen Röhre miteinander verwachsen sind, oder von denen durch Verwachsung von nur 9 Staubfäden eine oben durch einen Schlitz geöffnete Röhre gebildet wird, über dem das 10. freie Staubblatt liegt. Die Arten mit so aufgeschlitzter Staubfaden-

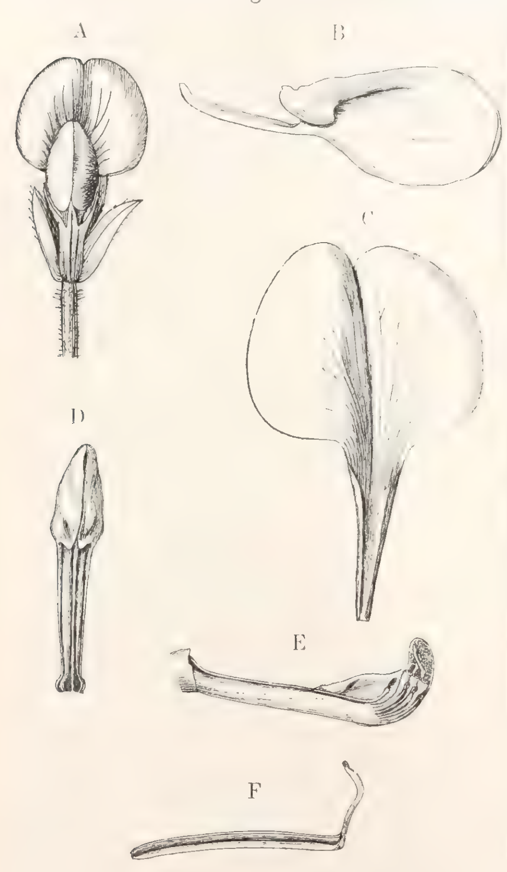


Fig. 42. Schmetterlingsblüte Tetragonolobus siliquosus. A Blüte von vorn in natürlicher Größe. B ein Flügel, von innen gesehen. C Fahne. D Schiffchen von oben gesehen, mit den Nektarzugängen am Grunde. E Schiffchen mit den eingeschlossenen Geschlechtsorganen nach Wegnahme des vorderen Schiffchenblattes. F Pistill von der Seite. 2 fach vergrößert.

röhre sondern im Blütengrund an der Fruchtknotenbasis Nektar aus, zu dem am Grunde des Schlitzes ein Zugang für Apiden eröffnet ist; die Arten mit völlig verwachsener Staubfadenröhre enthalten keinen Nektar. Im Innern der Staubblattröhre steht das Pistill.

a) Klappvorrichtung. Bei Insektenbesuch wird unter Vermittelung dei beiden mit dem Schiffchen am Grunde hebelartig verbundenen Flügel das Schiffchen so weit nach unten gedrückt, daß von den an ihrem Platze verbleibenden Geschlechtsorganen die Enden der Staubblätter mit den geöffneten Antheren und das Ende des Griffels mit der Narbe aus der Spitze des Schiffchens hervortreten und mit der Unterseite des Insektes in Berührung kommen. Nach Aufhören des Druckes beim Wegfliegen des Insektes klappen Flügel und Schiffchen wieder herauf, nehmen ihre alte Lage ein und die Geschlechtsorgane wieder in sich auf; es können also wiederholte erfolgreiche Insektenbesuche stattfinden (Cytisus, Astragalus, Oxytropis, Melilotus, Trifolium u. a.).

b) Bürsteneinrichtung. Eine am Griffel unterhalb der Narbe angebrachte bürstenartige Behaarung nimmt den vor Aufgehen der Blüte dort abgesetzten Pollen auf und befördert ihn bei eintretendem Insektenbesuch zugleich mit der Narbe aus der Spitze des Schiffchens, in dem Staubfäden und Antheren eingeschlossen bleiben; nach Abfliegen des Insektes kehren Flügel und Schiffchen in die frühere Lage zurück, wie beim vorigen Typus (Vicia, Pisum, Lathyrus u. a.).

c) Nudelspritzen- (Pumpen-)Einrichtung. Bei Abwärtsbewegung des Schiffchens infolge von Insektenbesuch tritt aus dem bis auf einen kleinen Spalt an der Spitze völlig geschlossenen Schiffchenende in jüngeren Blüten eine band- oder nudelförmige Pollenmasse hervor, die aus der hohlkegeligen Schiffchenspitze, wo sie bereits vor Aufgehen der Blüte abgesetzt worden ist, vermittelst der wie ein Spritzenkolben wirkenden, meist verdickten Staubfadenenden herausgepreßt wird. Nach Erschöpfung des Pollenvorrates kommt bei weiteren Insektenbesuchen das Griffelende mit der Narbe aus der Schiffchenspitze heraus. Bei Aufhören des Druckes kehren auch hier alle Blütenteile in ihre ursprüngliche Lage zurück (Lupinus, Coronilla, Lotus, Anthyllis u. a.).

d) Explosionseinrichtung. Schon vor Aufgehen der Blüte bildet sich zwischen dem Schiffchen und den darin eingeschlossenen Bestäubungsorganen eine antagonistische Spannung aus, weil die Enden der Geschlechtsorgane das Bestreben haben, sich nach aufwärts zu biegen oder einzurollen, hieran aber durch das umschließende Schiffchen gehindert werden; wird nun dieses Hindernis durch Herabdrücken des Schiffchens bei einem Insektenbesuch beseitigt, so schnellen die Bestäubungsorgane plötzlich hervor und schlagen gegen den Körper des Insektes, während Flügel und Schiffchen nach unten sinken und nicht mehr in ihre frühere Lage zurückkehren. Hier ist nur

einmaliger erfolgreicher Insektenbesuch möglich (Genista, Sarothamnus, Medicago u. a.).

e) Corydalis-Typus. Von den 4 Kronblättern entwickelt sich das obere in seinem vorderen Teile zu einer Fahne, während es nach hinten in einen kräftigen nektarhaltigen Sporn ausgeht, das untere ist unterlippenartig vorgestreckt, die zwei kleinen seitlichen entsprechen dem Schiffchen und umschließen fest das Griffelende mit der Narbe und die 6 Antheren am Ende der zu je 3 miteinander verwachsenen Staubfäden. Die Antheren geben im Knospenzustand ihren Pollen in die Schiffchenspitze ab, wo er die Narbe dicht bedeckt. Apiden, welche zur Gewinnung des Nektars den Rüssel zwischen den völlig zusammenschließenden Kronblättern oberhalb des Schiffchens einführen müssen, kommen in jungen Blüten mit dem aus der Schiffchenspitze hervortretenden Pollen, in älteren mit der nun freigelegten Narbe sternotrib in Berührung, und nach Abfliegen des Insektes kehren alle Blütenteile in ihre alte Lage zurück. Die scheinbar unvermeidliche Selbstbestäubung ist wirkungslos, weil die Narbe erst nach Abholung des Pollens und Zerreibung ihrer Oberfläche am Insektenkörper belegungsfähig wird.



Fig. 43. Blüte von Nigella arvensis, von der Seite gesehen, in natürlicher Größe. A jüngerer Zustand mit aufwärts gerichteten, noch narbenlosen Griffeln und aufgerichteten stäubenden Staubblättern. B späterer Zustand mit abwärts gekrümmten, Narbenstreifen führenden Griffeln und niedergelegten verstäubten Staubblättern.

f) Sympetaler Typus. Die verwachsenblättrige Krone ist in einzelne Abschnitte zerteilt, die große Ähnlichkeit mit Fahne, Flügeln und Schiffchen der Papilionaceen haben; bei eintretendem Insektenbesuch kommen die Apiden zuerst mit der Narbe, später mit den Antheren in Berührung und bewirken deshalb vorwiegend Fremdbestäubungen (Schizanthus, Collinsia).

5. Gruppe. Immenblumen mit Umwanderungseinrichtung (Fig. 43). Die hierher gerechneten, nicht sehr zahlreichen Blumen sind groß und ansehnlich, von aktinomorphen Bau und aufrechter Stellung; der Nektar wird im Blütengrunde in einer solchen Weise dargeboten, daß Insekten, um ihn auszubeuten, in einer ringförmigen Linie in der Blume umherwandern müssen; Antheren und Narbe befinden sich oberhalb des Besuchers in einer solchen Stellung, daß sie von den für die Bestäubung geeigneten Apiden mit dem Rücken berührt werden; Protandrie verbunden mit Platzwechsel der Bestäubungsorgane führt mit Sicherheit Allogamie herbei (Nigella, Passiflora).

6. Gruppe. Immenblumen mit Anklammerungseinrichtung (Fig. 44). Diese an Arten reiche Gruppe enthält hängende oder geneigte Immenblumen, deren Nektar von den Besuchern nur ausgebeutet werden kann, wenn sie sich von unten an die Blüten hängen und sich an dazu geeigneten Blütenteilen, häufig den herausragenden Geschlechtsorganen selbst, anklammern; der Pollen ist in der Regel von einer trockenen mehlartigen Beschaffenheit und wird den Besuchern auf eine bestimmte Körperstelle gestreut. Häufig schließen die Antheren zu einem den Pollen verwahrenden verkehrt-kegelförmigen Behältnis (Streukegel) zusammen, welches von den besuchenden Insekten so weit geöffnet wird, daß eine Portion Pollen herausfällt (Cerinthe, Symphytum, Borrago); ohne Ausbildung eines solchen Streukegels findet sich der Typus bei verschiedenen Monokotyledonen und auch bei Ranunculaceen (Pulsatilla, Aquilegia) wieder. Dichogamie kommt häufig, Trennung der Geschlechter selten vor.

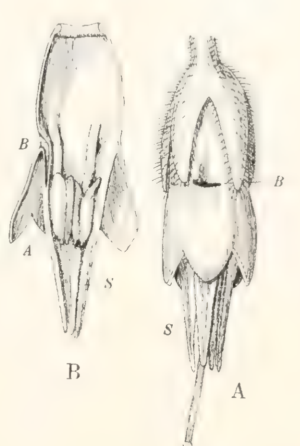


Fig. 44. Symphytum bulbosum. A Blüte von außen gesehen. B Krone und Staubblätter im Längsschnitt. 3fach vergrößert. A Antheren, S Hohlschuppen, B Basis einer solchen.

7. Gruppe. Immenfallen (Fig. 45) nennt man Immenblumen mit Einrichtungen, durch welche die Apiden an den Blumen eine Zeitlang gefangen gehalten, festgeklemmt oder sonstwie vergewaltigt werden, bis sie

die Bestäubung vollzogen haben. Die meistens sehr sonderbar gestalteten Blumen ähneln zum Teil den in der 6. Klasse, Gr. 6 angeführten Klemmfallenblumen, von denen sie sich durch ansehnlichere Dimensionen unterscheiden (Asclepiadaceae), zum Teil den Kesselfallenblumen (Kl. 6, Gr. 3) und kommen in dieser Ausbildung besonders bei verschiedenen Orchidaceae (Cypripedilum, Stanhopea, Calopogon u. a.) vor. Viele Formen dieser Gruppe sind an einen sehr engen Besucherkreis angepaßt und zu spontaner Autogamie unfähig.

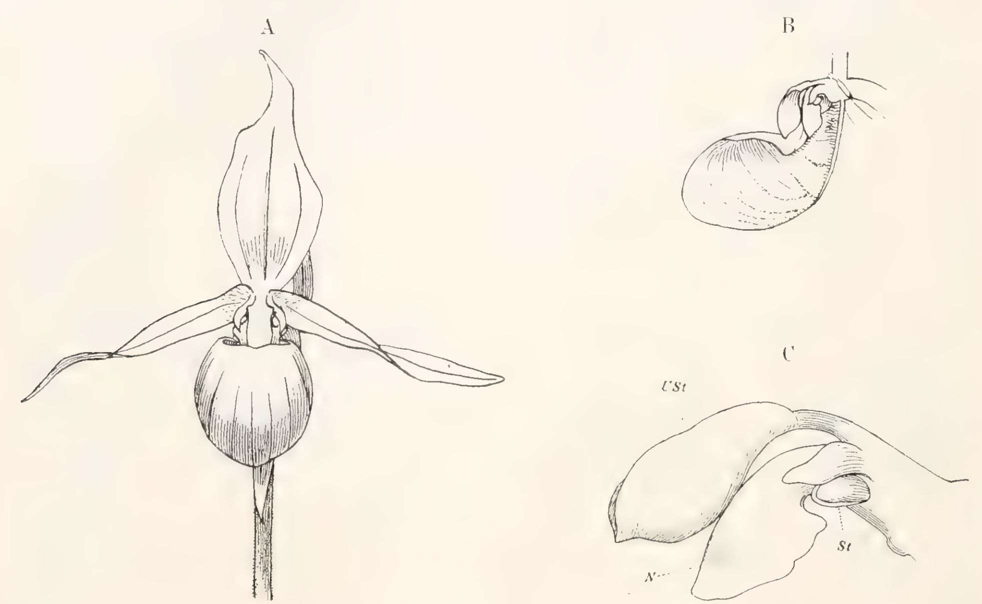


Fig. 45. Cypripedilum calceolus. A Blüte von vorn in natürlicher Größe. B Lippe und Geschlechtssäule im Längsschnitt, natürliche Größe. C Geschlechtssäule von der Seite gesehen, 3 fach vergrößert; N Narbe, St eines der beiden fruchtbaren Staubblätter, USt das unfruchtbare Staubblatt.

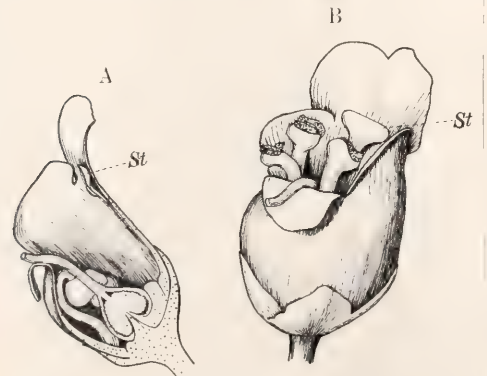


Fig. 46. Blüte von Scrophularia nodosa 4 fach vergrößert. A jüngere im weiblichen Zustand befindliche Blüte im Längsschnitt. B späterer, männlicher Zustand; St Staminodium.

2. Unterklasse. Wespenblumen — Hw. Sie sind viel seltener als die Immenblumen und meist für den Besuch von Grab- und Faltenwespen, in einzelnen Fällen von Schlupf- und Gallwespen eingerichtet.

1. Gruppe. Eigentliche Wespenblumen (Fig. 46) stimmen darin überein, daß sie eine trübe, oft bräunliche Färbung und einen bauchig erweiterten Nektarhalter besitzen, worin der Nektar reichlich und in einer den Wespen leicht zugänglichen Weise abgesondert wird; Protogynie oder Herkogamie begünstigen die Fremdbestäubung (Scrophularia, Epipactis).

2. Gruppe. Schlupfwespenblumen sind unscheinbar, duftlos, mit völlig offen liegendem Nektar, an schattigen Standorten wachsend (Listera).

3. Gruppe. Gallwespenblumen haben sich in einer höchst merkwürdigen Weise bei den Arten der großen Gattung Ficus ausgebildet, deren weibliche Blüten von Gallwespenarten bestäubt werden, welche ihre Brut in besonders umgebildeten Blüten (Gallenblüten) zur Entwickelung bringen.

8. Klasse. Falterblumen—F (Fig. 47). Sie umschließen in Deutschland 4,5% der Entomogamen und sind durch die sehr tiefe Bergung des Nektars, die sie nur mit den Vogelblütlern gemeinsam haben, ferner aber dadurch gekennzeichnet, daß der Nektar in sehr engen Röhren oder in Behältern mit sehr engem Zugang verwahrt wird, die seine Aus-

beutung durch den langen und dünnen Schmetterlingsrüssel zulassen, andere weniger langrüsselige Insekten aber vom Nektargenuß ausschließen; in der Regel entbinden die Falterblumen starke würzige Düfte. Viele Blumen dieser Klasse unterscheiden sich von nächstverwandten Immenblumen nur durch die Art der Nektarbergung; vorkommende Zwischenstufen werden Immen-Falterblumen (HF) genannt. Ihrem Bau nach zerfallen die Falterblumen in solche, auf oder an denen die Besucher während des Saugens sich niederlassen, die dementsprechend mit einem Anflugplatz ausgestattet sind, und in solche, die von im Fluge saugenden Schwärmern besucht werden und keine besondere Landestelle darbieten. Nach Farbe, Zeichnung und Insektenbesuch lassen sich folgende Unterklassen unterscheiden.

1. Unterklasse. Tagfalterblumen — Ft. Sie werden durch bei Tage fliegende Schmetterlinge, und zwar nicht nur Rhopalocera, sondern auch einzelne Eulen (z. B. Plusia gamma) und Schwärmer (z. B. Macro-

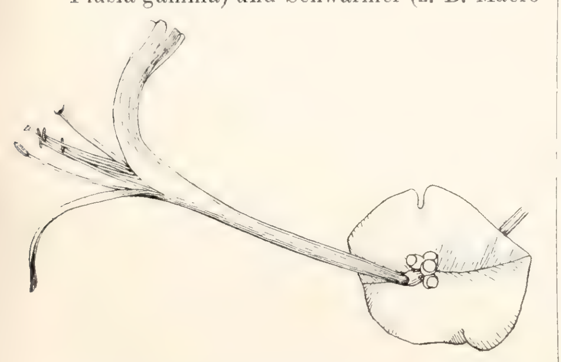


Fig. 47. Blüte von Lonicera caprifolium, von der Seite gesehen. Wenig vergrößert.

glossa stellatarum) besucht und bestäubt, und zeichnen sich durch lebhafte, oft brennende Farben aus, unter denen namentlich die rote, die eine Lieblingsfarbe der Tagfalter zu sein scheint, häufig ist, aber auch violette und blaue nicht fehlen. In der Regel tragen die Blumen, die von erheblicher Augenfälligkeit, bald aktinomorph, bald zygomorph gebaut sind, Saftmale und sind zwitterig, doch oft mit Ausbildung von gynomonöcisch oder gynodiöcisch verteilten weiblichen, seltener mit männlichen Blüten neben jenen. Die Zwitterblüten sind häufig protandrisch, seltener protogynisch oder homogam, dann aber meist herkogam. Die den Nektar bergende Röhre wird bald durch Verwachsung, bald durch dichten, vom Kelch unterstützten Zusammenschluß der Kron- oder Blütenhüllblätter hergestellt, oder sie ist in Form eines langen Spornes oder röhriger Kanäle an den Blütenhüllblättern ausgebildet. (Lilium bulbiferum, Hemerocallis, Dianthus, Phlox, Gentiana verna, Gymnadenia, Centranthus.)

2. Unterklasse. Nachtfalterblumen — Fn. Sie zeigen im ganzen einen ähnlichen Bau wie die Tagfalterblumen, haben aber eine weiße oder doch helle, in der Abenddämmerung hervortretende Blütenfarbe und keine Saftmale; häufig öffnen sie sich erst abends und schließen sich am Tage (Nachtblumen, nyktigame Blüten); ihre meist sehr intensiven und würzigen Düfte entbinden sie am Abend während der Flugzeit ihrer Besucher (Narcissus poëticus, Platanthera, Silene nutans u. a.), doch gibt es auch duftlose, wie die eine „Revolverblüte“ mit 5 engen Nektarzugängen repräsentierende von Convolvulus sepium. Die meisten speziell an die langrüsseligen Sphingidae angepaßten Falterblumen (Schwärmerblumen, Sphingogamae, Sphingophilae — Fs) zeichnen sich durch außerordentliche Länge und Enge der im Grunde den Nektar bergenden Röhren aus, die z. B. bei Lonicera caprifolium 25 bis 30 mm, bei Nicotiana longiflora aber über 15 cm, und bei der Orchidee Angraecum sesquipedale sogar bis 29 cm lang wird. Man kann noch im besonderen Nachtschwärmerblumen und Tagschwärmerblumen voneinander unterscheiden.

Einen ganz abweichenden, auf außerordentlich enger Anpassung beruhenden Typus stellt die Bestäubung der amerikanischen Yucca-Arten durch die Yucca-Motten dar, Tineiden aus der Gattung Pronuba, deren Weibchen eine sonst bei Schmetterlingen gar nicht vorkommende Ausrüstung zum Einsammeln des Yucca-Pollens besitzen: zwei am Basalteil der Kiefertaster sitzende, krümmungsfähige Fortsätze, die als Tentakeln bezeichnet werden.

9. Klasse. Käferblumen (Cantharogamae, Cantharophilae) — K. Diese Blumenklasse steht auf ziemlich schwachen Füßen, da bei den hierher gerechneten Arten bestimmte Anpassungen an die Käfer nicht hervortreten und nur ein mehr oder weniger vorwiegender Besuch durch Käfer an ihnen beobachtet ist. Delpino findet die Blumen dieser Klasse immer mit Düften ausgestattet, selten nektarhaltig, dafür aber den Besuchern reichlichen Pollen oder Futtergewebe darbietend, und unterscheidet großblumige (Nymphaea, Euryale, Victoria, Magnolia) und kleinblumige (Cornus- und Hydrangea-Arten), zu denen vielleicht auch noch einige Palmenblüten und diejenigen von Aruncus silvester gerechnet werden müssen.

10. Klasse. Dientomogamae (Dientomophilae). Eine sehr kleine Gruppe, deren Arten zweierlei in der Form etwas

verschiedene Blüten besitzen, von denen jede an eine andere Gruppe von bestäubenden Insekten angepaßt ist; so wird von Iris pseudacorus eine Blütenform, bei der die Griffeläste nebst den unter ihnen liegenden Antheren 6 bis 10 mm über den darunter befindlichen Blütenblättern stehen, nur von Hummeln, eine andere, bei der die Griffeläste den Blütenblättern dicht anliegen, nur von Schwebfliegen bestäubt, und von Primula farinosa ist die nordische Form an Apiden, die alpine mit etwas größeren und lebhafter gefärbten Kronen und verengerter Kronröhre an Falter angepaßt.



Fig. 48. Blüte von Campsis radicans im Längsschnitt. Natürliche Größe.

11. Klasse. Vogelblütler (Ornithogamae, Ornithophilae) — O (Fig. 48). Blumen dieser Klasse haben sich nur in der Heimat der in Abschnitt 7b unter b und c besprochenen Vogelfamilien der Nectariniidae, Meliphagidae, Zosteropidae und Trochilidae, also in den Tropen der alten und neuen Welt und in Australien nebst den dazu gehörigen Inselgruppen, ausgebildet. Sie zeichnen sich durch grelle, oft schreiend rote, häufig große und tiefe Blüten aus und bieten ihren Besuchern bald außerordentlich reichlichen, aber wässerigen Nektar, bald zuckersüße Blütenblätter als Genußmittel, werden aber in manchen Fällen von den Vögeln nur um der an den Blüten sich ansammelnden Insekten willen aufgesucht und können deshalb sogar nektarlos sein. Sie sind entweder auf den Besuch solcher Vögel berechnet, die im Schweben saugen, oder die Bestäuber nehmen an oder auf den Blüten Platz. Ornithophile Blüten sind aus den Familien der Amaryllidaceae, Musaceae, Cannaceae, Liliaceae, Proteaceae, Onagraceae, Myrtaceae, Leguminosae, Malvaceae, Tropaeolaceae, Cactaceae, Marcgraviaceae, Solanaceae, Bignoniaceae, Gesneriaceae, Lobeliaceae, Ericaceae, Acanthaceae, Convolvulaceae u. a. bekannt, doch gestatten die vorliegenden Beobachtungen und Untersuchungen bisjetzt noch keine eingehendere Einteilung in bestimmte Typen.

Die gelegentlich als besondere Blumenklassen aufgestellten Schneckenblütler (Malacogamae, Malacophilae — M) und Fledermausblütler (Chiropterogamae, Chiropterophilae — Ch) bedürfen noch genauerer Untersuchung und Begründung.

Literatur. ***Ch. K. Sprengel***, *Das entdeckte Geheimnis der Natur im Bau und in der Befruchtung der Blumen. Berlin 1793.* — ***Ch. Darwin***, *Ueber die Einrichtungen zur Befruchtung britischer und ausländischer Orchideen durch Insekten. Deutsche Uebers. Stuttgart 1862.* — ***F. Delpino***, *Ulteriori osservazioni sulla dicogamia nel regno vegetale. Atti della Soc. Ital. delle sc. nat. in Milano, 1868 bis 1874.* — ***H. Müller***, *Die Befruchtung der Blumen durch Insekten und die gegenseitigen Anpassungen beider. Leipzig 1873.* — ***Ch. Darwin***, *Die Wirkungen der Kreuz- und Selbstbefruchtung im Pflanzenreich. Deutsche Uebers. Stuttgart 1877.* — ***H. Müller***, *Die Alpenblumen, ihre Befruchtung durch Insekten und ihre Anpassungen an dieselben. Leipzig 1881.* — ***Ch. Robertson***, *Flowers and Insects. Botanical Gazette 1889 bis 1896, und Transactions of the St. Louis Acad. of Science. Vol. 5 u. 6, 1891 bis 1894.* — ***P. Knuth***, *Handbuch der Blütenbiologie. Leipzig 1898 bis 1905.* — ***A. Kerner von Marilaun***, *Pflanzenleben. Bd. 2, Leipzig und Wien 1891, 2. Aufl. 1898.* — ***E. Loew***, *Einführung in die Blütenbiologie auf historischer Grundlage. Berlin 1895.* — ***O. Kirchner***, *Blumen und Insekten, ihre Anpassungen aneinander und ihre gegenseitige Abhängigkeit. Leipzig und Berlin 1911.*

O. Kirchner.

Bewegung.

Allgemeine Bewegungslehre.

I. Allgemeines. II. Kinematik: 1. Aufgabe der Kinematik. 2. Der substantielle Punkt und der starre Körper. 3. Koordinatensysteme. Bezugssysteme. Beschreibung der Lage substantieller Punkte. 4. Bewegung eines substantiellen Punktes. Bewegungsgleichungen. Bahnkurven. Verschiebung. 5. Die gleichförmig geradlinige Bewegung. Die Geschwindigkeit. Geschwindigkeitsmaß. Geschwindigkeitstabelle. Geschwindigkeitsvektor. 6. Ungleichförmig geradlinige Bewegung (Durchschnittsgeschwindigkeit, Geschwindigkeit). 7. Beliebige ungleichförmige Bewegung (Durchschnittliche Verschiebungsgeschwindigkeit, Geschwindigkeit). Hodograph. 8. Begriff der Beschleunigung. Gleichförmige Beschleunigung. Gleichförmige Kreisbewegung. Tangentiale und

normale Beschleunigung. 9. Flächengeschwindigkeit. 10. Zusammensetzung und Zerlegung von Bewegungen. Parallelogramm der Geschwindigkeit und Beschleunigung. Wurfbewegung. 11. Die Bewegung des starren Körpers. Translation. Rotation. Schraubung. 12. Bewegungsfreiheit. Freiheitsgrade. 13. Periodische und stationäre Bewegungen. III. Dynamik: 14. Aufgabe der Dynamik. 15. Trägheit. Trägheitsgesetz. Fundamentalkörper. Inertialsystem. 16. Kraft. Masse. Kraftgesetz. 17. Satz vom Kräfteparallelogramm. 18. Bewegungsgröße. Impuls. Das Gesetz der Gleichheit von Wirkung und Gegenwirkung. 20. Schwerpunkt. Bewegung des Schwerpunktes. 21. Drehimpuls. Flächensatz. 22. Trägheitskraft. Zentrifugalkraft. 23. Das d'Alembertsche Prinzip. 24. Bewegung auf der schiefen Ebene. Atwoodsche Fallmaschine. 25. Bewegung starrer Körper. 26. Zyklische und stationäre Bewegungen. Stabilität von Bewegungen. 27. Relativbewegung bei geradlinig bewegtem Bezugskörper. Relativitätsprinzip.

I. Allgemeines. Man beschreibt die Bewegung eines Körpers durch Angabe der Lagen, die er im Laufe derselben nach und nach einnimmt, und der Zeit, zu welcher er diese Lagen erreicht. Die Lage eines Körpers gibt man aber an, indem man die Entfernung seiner einzelnen Teile von anderen Körpern oder geometrische Größen, aus denen diese Entfernungen berechnet werden können, angibt. Wenn ich also die Lage eines Körpers A angebe, so muß in dieser Angabe noch mindestens *ein* anderer Körper vorkommen, *in bezug* auf den oder *relativ* zu dem ich die Lage von A beschreibe. Dieser Körper B heißt der *Bezugskörper* unserer Lagebestimmung. Es muß daher auch in jeder Beschreibung einer Bewegung von A, da ja diese Beschreibung in einer Aufzählung von Lagen besteht, ein Bezugskörper B vorkommen, in bezug auf den (oder relativ zu dem) die Bewegung des Körpers A beschrieben wird.

II. Kinematik. 1. Aufgabe der Kinematik. Die *Kinematik*, auch *Phoronomie* genannt, beschreibt und klassifiziert alle denkbaren Bewegungen von Körpern relativ zu beliebigen Bezugskörpern; sie untersucht, wie sich die Beschreibung einer Bewegung ändert, wenn ich den Bezugskörper wechsle. Dabei sind alle Bezugskörper gleichberechtigt. Man sagt kurz: die Kinematik hat es nur mit *Relativbewegungen* zu tun.

2. Begriff des substantiellen Punktes und des starren Körpers. Die verschiedenen Teile eines Körpers können verschiedene Bewegungen ausführen. Einen je kleineren Teil des Körpers wir aber ins Auge fassen, desto weniger werden innerhalb dieses Teiles Unterschiede in der Bewegung vorhanden sein. Wir lassen schließlich diesen Teil auf eine bestimmte Stelle des Körpers zusammenschrumpfen und betrachten die Bewegung dieser Stelle. Man nennt eine solche Stelle eines Körpers, die dessen Bewegung mitmacht, einen *substantiellen Punkt*. Man kann sich einen solchen annähernd durch einen auf dem bewegten Körper angebrachten Tintenpunkt versinnbildlichen. Ein substantieller Punkt ist zu unterscheiden vom geometrischen Raumpunkt, von dem das Prädikat Bewegung nicht ausgesagt werden kann. Man kann sich auch den ganzen übrigen Körper wegdenken und die Bewegung einzelner substantieller Punkte ins Auge fassen.

Wenn zwei substantielle Punkte bei keiner Bewegung ihre gegenseitige Entfernung ändern, so sagt man: sie sind *starr verbunden*. Wenn alle substantiellen Punkte eines Körpers starr untereinander verbunden sind, so heißt er ein *starrer Körper*. In der Natur finden wir den Begriff des starren Körpers nur annähernd verwirklicht. So behalten z. B. die einzelnen Teilchen eines Granitblockes, solange er nicht zertrümmert wird oder verwittert, ihre gegenseitige Entfernung durch lange Zeiten hindurch annähernd bei.

3. Beschreibung der Lage eines substantiellen Punktes. Koordinatensysteme. Bezugssysteme. Als Bezugskörper wählt man immer starre Körper. Und zwar wollen wir zunächst angeben, wie die Lage eines substantiellen Punktes P relativ zu einem starren Bezugskörper K festgelegt wird. Wir wählen in K einen beliebigen substantiellen Punkt O und legen durch ihn drei wechselseitig aufeinander senkrecht stehende Gerade, die auch aus substantiellen Punkten bestehen, d. h. jede Bewegung von K mitmachen sollen. Man nennt diese Figur ein Koordinatensystem und insofern sie Teil eines Bezugskörpers ist, ein *Bezugssystem*. Wir wollen kurz vom System S sprechen. Man nennt O den Koordinatenursprung, die drei Geraden die Koordinatenachsen, wir wollen sie als X-, Y- bezw. Z-Achse bezeichnen. Die Lage eines substantiellen Punktes P relativ zu K läßt sich dann durch seine drei Koordinaten im System S festlegen; denn durch die Angabe dieser drei Größen ist die Entfernung des substantiellen Punktes P von allen Punkten des Körpers K festgelegt. Wir wollen die Koordinaten des Punktes P im System S mit x, y, z bezeichnen. Man kann die Angabe der drei Zahlen x, y, z auch durch Angabe der Strecke OP nach Länge, Richtung und Sinn ersetzen, oder wie man kurz sagt, durch Angabe des vom Ursprung nach P gezogenen *Vektors*. Wir bezeichnen diesen Vektor mit $\mathfrak{r}$ und nennen ihn den *Lagevektor* von P in bezug auf S. Bezeichnen wir die Länge des Vektors $\mathfrak{r}$ mit $|\mathfrak{r}|$, die Winkel, die er mit den Koordi-

natenachsen einschließt, mit α, β, γ, so gelten die aus der analytischen Geometrie des Raumes bekannten Beziehungen:

$$|\mathfrak{r}| = +\sqrt{x^2 + y^2 + z^2},$$
$$\cos\alpha = \frac{x}{|\mathfrak{r}|},\ \cos\beta = \frac{y}{|\mathfrak{r}|},\ \cos\gamma = \frac{z}{|\mathfrak{r}|} \quad . \ . \ . \ 1)$$

Die Koordinaten sind die Komponenten des Lagevektors in den Achsenrichtungen.

Man kann die Lage eines Punktes relativ zu einem Bezugskörper K anstatt durch seine rechtwinkeligen Koordinaten auch durch irgendwelche andere Größen, aus denen die rechtwinkeligen Koordinaten sich berechnen lassen, festlegen. Solche Größen nennt man g e n e r a l i s i e r t e K o o r d i n a t e n. Ein wichtiger Spezialfall sind die Polarkoordinaten. Wir wählen wieder einen Punkt O auf K und legen die Lage des Punktes P fest: durch die Entfernung $r = \overline{OP}$, durch die auf der mit dem Radius r um O geschlagenen Kugel gemessene geographische Länge φ und Breite ϑ, wobei Aequator und Nullmeridian noch beliebig gewählt werden können; wählen wir die xy-Ebene zum Aequator, die xz-Ebene zum Nullmeridian, so berechnet man die rechtwinkeligen Koordinaten aus den Formeln:

$$x = r\cos\vartheta\cos\varphi,\ y = r\cos\vartheta\sin\varphi,\ z = r\sin\vartheta \ . \ . \ 2)$$

4. Beschreibung der Bewegung eines substantiellen Punktes. Bewegungsgleichungen. Bahnkurven. Man beschreibt die Bewegung von P relativ zu K, indem man die Lage angibt, welche P in jedem Zeitpunkt relativ zu K einnimmt; das kann nun dadurch geschehen, daß wir die Werte der Koordinaten von P in dem mit K verbundenen System S für jeden Zeitpunkt angeben. Bezeichnen wir die Zeit, von irgendeinem willkürlichen Anfangspunkt an gemessen, mit t, so müssen vermöge der Bewegung zu jedem Werte von t bestimmte Werte der Koordinaten gehören; d. h. die Koordinaten müssen als Funktionen der Zeit gegeben sein:

$$x = \varphi(t),\ y = \chi(t),\ z = \psi(t) \ . \ . \ . \ 3)$$

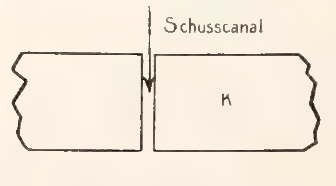
Durch diese drei Gleichungen ist eine Bewegung beschrieben, wenn die φ, χ, ψ gegebene Funktionen sind. Man nennt dann die Gleichungen (3) die B e w e g u n g s g l e i c h u n g e n relativ zum System S.

Anstatt der Koordinaten kann man auch den Wert des Lagevektors $\mathfrak{r}$ für jeden Zeitpunkt angeben. Man erhält dann statt der drei Bewegungsgleichungen (3) eine einzige Vektorgleichung:

$$\mathfrak{r} = \mathfrak{p}(t) \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ 4)$$

wo $\mathfrak{p}(t)$ eine Vektorfunktion von t ist, d. h. jedem Wert von t einen Vektor $\mathfrak{p}(t)$ zuordnet. Natürlich ist jede Vektorgleichung drei Zahlengleichungen äquivalent.

Wir denken uns nun den Bezugskörper K so groß, daß die ganze Bewegung von P innerhalb seiner Grenzen vor sich geht. Dann denken wir uns auf K (z. B. durch Tintenpunkte) die Stellen markiert, an denen sich P im Laufe seiner Bewegung befindet. Die Gesamtheit dieser Stellen bildet eine in K verlaufende Kurve, die wir die B a h n k u r v e der Bewegung von P in bezug auf K nennen. Wir können uns die Sache noch anschaulicher vorstellen: Es sei P ein Projektil, dann wird es während seiner Bewegung den Körper K, der ihm keinerlei Widerstand entgegensetzen soll, durchbohren; die so entstehende Schußröhre ist die Bahnkurve von P in bezug auf K. Man sieht hier deutlich, daß man von der Bahnkurve einer bestimmten empirisch gegebenen Bewegung immer nur relativ zu einem bestimmten Bezugskörper sprechen kann. Denn die Schußröhre wird ja ihre Gestalt ändern, wenn wir den Körper K sich bewegen lassen. Wenn z. B. der Punkt P bei seiner Bewegung den Körper K in einer geraden Linie durchbohrt, so wird er einen Körper K′, der gegen K in Drehung begriffen ist, wenn nur nicht die Schußlinie gerade die Drehungsachse ist, offenbar in einer schraubenartig gewundenen Röhre durchbohren. Ein anderes für manche Anwendungen wichtiges Beispiel ist folgendes: Der Punkt P durchbohrt den Körper K in einer Geraden, die parallel der y-Richtung ist. Wenn wir nun einen Körper K′ betrachten, der sich geradlinig in einer zur Schußlinie senkrechten Richtung, etwa der x-Richtung, bewegt, so wird er von P in einer Linie durchbohrt, die gegen die y-Richtung, also die Schußlinie durch K, geneigt ist (Fig. 1). Diese Bemerkung wird bei der Erklärung der Aberration



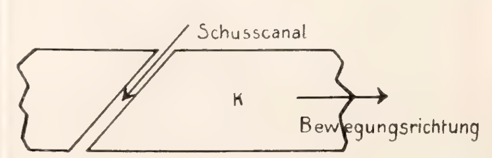


Fig. 1.

des Lichtes (vgl. den Artikel „L i c h t f o r t p f l a n z u n g i n b e w e g t e n M e d i e n“) verwendet. Der Begriff der Bahnkurve ist also bloß ein relativer.

Die Gleichungen (3) geben uns auch im Sinne der analytischen Geometrie die Gleichungen der Bahnkurven, falls wir t als Parameter auffassen. Wir können die Kurvengleichungen auch in der gewöhnlichen Gestalt erhalten, wenn wir t aus ihnen eliminieren. Sie lauten dann:

$$y = \Phi(x) \quad z = \Psi(x) \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ 5)$$

Falls die Bahnkurve ganz in einer Ebene

liegt, nennt man die Bewegung eine ebene Bewegung.

Jede nicht ebene Bahnkurve nennt man doppelt gekrümmt, weil sie nicht nur die Krümmung in der Ebene besitzt, wie z. B. der Kreis, sondern noch eine Krümmung aus der Ebene heraus.

Wenn der Punkt P sich zur Zeit t_1 in A_1, zur Zeit t_2 in A_2 befindet, so nennen wir die Strecke A_1A_2 nach Länge, Richtung und Durchlaufungssinn betrachtet, die Verschiebung des Punktes P im Zeitraum t_1, t_2. Die Verschiebung ist unabhängig davon, durch welche Zwischenstadien der Punkt von A_1 nach A_2 gelangt ist. Sie läßt sich durch einen Vektor, eben die Strecke von A_1 nach A_2, darstellen, den wir $\mathfrak{d}_{12}$ nennen wollen. Es seien $\mathfrak{r}_1$ und $\mathfrak{r}_2$ die Lagevektoren der Stellen A_1 und A_2, dann bilden die Punkte O, A_1, A_2 ein Dreieck, dessen Seiten $\mathfrak{r}_1$, $\mathfrak{d}_{12}$, $\mathfrak{r}_2$ sind (Fig. 2). Im Sinne der Vektoraddition ist dann $\mathfrak{r}_2$ die Summe aus $\mathfrak{r}_1$ und $\mathfrak{d}_{12}$:

$$\mathfrak{r}_2 = \mathfrak{r}_1 + \mathfrak{d}_{12},$$

daher:

$$\mathfrak{d}_{12} = \mathfrak{r}_2 - \mathfrak{r}_1 \quad \ldots\ldots\ldots \quad 8)$$

Die Verschiebung im Zeitraum t_1, t_2 ist die Vektordifferenz (vgl. den Artikel „Physikalische Größen“) der dem End- und Anfangspunkte des Zeitraums entsprechenden Lagevektoren.

5. Die gleichförmig geradlinige Bewegung. Wir legen von nun an ein bestimmtes, ein für allemal beliebig gewähltes, Bezugssystem S zugrunde. Wir betrachten die Bewegung von P längs einer Geraden. Wenn in gleichen Zeiten auch immer gleiche Wege zurückgelegt werden, nennen wir die Bewegung eine gleichförmige. Den in der Zeiteinheit zurückgelegten Weg bezeichnen wir mit c, dann ist der in der doppelten Zeit zurückgelegte Weg 2 c usw. und der in t Zeiteinheiten zurückgelegte Weg c t;

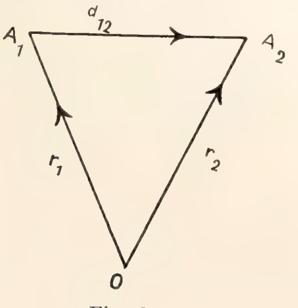


Fig. 2.

bezeichnen wir diesen Weg mit s, so lautet die Bewegungsgleichung der geradlinig gleichförmigen Bewegung:

$$s = ct \quad \ldots\ldots\ldots \quad 9)$$

Den der in Zeiteinheit zurückgelegten Weg c nennt man die Geschwindigkeit der gleichförmigen Bewegung; aus (9) folgt:

$$c = \frac{s}{t} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 10)$$

d. h. die Geschwindigkeit ist gleich dem Quotienten des vom Anfangspunkt der Zeitzählung zurückgelegten Weges durch die verflossene Zeit. Schließlich folgt:

$$t = \frac{s}{c} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 11)$$

Da in jeder beliebigen Zeiteinheit der gleiche Weg zurückgelegt wird, so können wir c als den Quotienten eines beliebigen Wegstückes durch die Zeit, in der es zurückgelegt wird, betrachten. Es sei etwa die Gerade, längs der die Bewegung stattfindet, die x-Achse; P befinde sich zur Zeit t_1 in x_1, zur Zeit t_2 in x_2, so ist $x_2 - x_1$, der in der Zeit t_1, t_2 zurückgelegte Weg, gleichzeitig die Verschiebung während dieser Zeit, also:

$$x_2 - x_1 = \mathfrak{d}_{12}$$

die verflossene Zeit ist $t_2 - t_1$, also:

$$c = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = \frac{\mathfrak{d}_{12}}{t_2 - t_1} \quad \ldots\ldots \quad 12)$$

Da die Geschwindigkeit ein Weg in der Zeiteinheit ist, hängt ihre Maßzahl von der Wahl der Zeiteinheit und Längeneinheit ab. Legt ein Körper 1 cm in 1 Sekunde zurück, so sagen wir: seine Geschwindigkeit beträgt 1 cm/sec; analoge Bedeutung hat etwa der Ausdruck 1 km/Stunde usw.

Um eine konkrete Vorstellung von den Maßzahlen der Geschwindigkeiten, denen man in der Natur und im Verkehr begegnet, zu erzielen, seien im folgenden einige Zahlen angeführt. Dabei ist, wo nichts anderes gesagt, die m/sec zur Einheit gewählt, so daß etwa die Zahl 5 bedeutet: es werden 5 m in der Sekunde zurückgelegt:

Licht im leeren Raum:	3×10^8
Erde bei der Bewegung um die Sonne:	29 800
Erdoberfläche bei der Achsendrehung am Äquator:	464
in Berlin:	283
Fall der Regentropfen:	5
Schall in der Luft bei 10° C:	337,8
Mäßiger Wind:	7
Starker Wind:	12
Sturm im Binnenland bis:	19
Seesturm bis:	38
Marschgeschwindigkeit im deutschen Heer: Exerziervorschrift:	1,53
Eilschritt:	1,85
Schnelläufer auf kleine Entfernungen:	8,3
Schnelläufer auf große Entfernungen:	4,4
Schlittschuhläufer:	13
Skiläufer auf stark geneigter Bahn:	24
Kräftiger Steinwurf (Anfangsgeschwindigkeit)	16
Geschoß des Infanteriegewehrs (Anfangsgeschwindigkeit):	650
Leitungsgeschwindigkeit im Nervensystem:	31—94

	m/sec.	km/Stde.
Blutbewegung in den größeren Arterien:	0,31—0,34	
Wasser in schnellen Flüssen:	4	
Wasser in schiffbaren Flüssen:	1	
Pferd in gewöhnlichem Galopp:	4—5	14—18
Kamel in Karawanen	1—1,1	4
Elefant im Lauf	4,2—5,6	15—20
Schnecke	0,0016	0,006
Orientexpreß Paris—Wien (Aufenthalt eingerechnet):	16	58
Bergbahn Innsbruck—Brenner: Bergfahrt:	7,3	26
Talfahrt:	11,3	41
Elektrische Hoch- und Untergrundbahn Berlin:	13,9	50
Radfahrer (gewöhnliche Fahrt):	4,—5	15—18
Automobil (beim Rennen):	37,9	136
Ozeandampfer (gewöhnliche Fahrt)	—	25—28
(schnellste Leistung)	—	45

Die Gerade, auf welcher P sich bewegt, möge mit den Koordinatenachsen die Winkel α, β, γ einschließen. Wenn dann s der Weg ist, den P auf der Geraden vom Zeitanfang $t = 0$ an zurückgelegt hat und wir den Koordinatenursprung in den Anfangspunkt der Bewegung verlegen, so wird das durchlaufene Stück s der Geraden identisch mit dem Lagevektor von P zur betreffenden Zeit. Die Koordinaten von P werden also:

$$x = s \cos \alpha, \quad y = s \cos \beta, \quad z = s \cos \gamma,$$

voraus wegen $s = ct$ folgt:

$$x = c\,t \cos \alpha,\ y = c\,t \cos \beta,\ z = c\,t \cos \gamma \quad 13)$$

Das sind die Bewegungsgleichungen einer allgemeinen geradlinig gleichförmigen Bewegung mit der Geschwindigkeit c.

Wenn wir einen Vektor ziehen, der zur Länge den Betrag c der Geschwindigkeit und die Richtung und den Sinn der Bewegung in der gegebenen Geraden hat, so nennen wir ihn den G e s c h w i n d i g k e i t s v e k t o r; wir bezeichnen ihn mit $\mathfrak{v}$. Seine Komponenten sind seine Projektionen auf die Achsen, wir bezeichnen sie mit $\mathfrak{v}_x$, $\mathfrak{v}_y$, $\mathfrak{v}_z$; sie sind dann:

$$\mathfrak{v}_x = c \cos \alpha, \quad \mathfrak{v}_y = c \cos \beta, \quad \mathfrak{v}_z = c \cos \gamma.$$

Aus diesen Gleichungen in Verbindung mit (13) folgt, daß die Bewegungsgleichungen auch in der Form:

$$x = \mathfrak{v}_x\,t, \quad y = \mathfrak{v}_y\,t, \quad z = \mathfrak{v}_z\,t \quad 14)$$

geschrieben werden können, d. h. die Projektion des Punktes P auf die x-Achse führt eine gleichförmig geradlinige Bewegung längs dieser Achse mit der Geschwindigkeit $\mathfrak{v}_x$ aus, die der x-Komponente des Geschwindigkeitsvektors gleich ist.

6. Ungleichförmig geradlinige Bewegung. Der Punkt P möge sich jetzt längs einer Geraden nach einem beliebigen Gesetze bewegen; d. h. seine Entfernung s vom Ausgangspunkt, sein Weg, sei eine beliebige Funktion der Zeit t:

$$s = \varphi(t) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 15)$$

Wenn man definieren will, was „Geschwindigkeit im Zeitpunkt t_0" heißt, so setzt man sich zunächst dem Einwand aus, daß ein Körper sich ja in einem einzelnen Z e i t p u n k t gar nicht bewegt, sondern nur in einer Z e i t s t r e c k e, ein Einwand, von dem die bekannten Paradoxien der Eleaten ausgehen. Um diesen Schwierigkeiten zu entgehen, gibt die moderne Bewegungslehre die im folgenden dargestellte Definition der Geschwindigkeit, die wohl manchem als zu kompliziert für einen so einfachen Begriff erscheinen wird, aber zur Vermeidung aller Unklarheiten notwendig ist.

Wir betrachten einen bestimmten Zeitpunkt t_0, da befindet sich P im Punkte $s_0 = \varphi(t_0)$, ferner einen zweiten Zeitpunkt t_1, da ist $s_1 = \varphi(t_1)$, die Verschiebung von P in der Zeitstrecke t_0, t_1 beträgt $s_1 - s_0 = \varphi(t_1) - \varphi(t_0)$; wir können nun fragen: mit welcher Geschwindigkeit c_1 hätte sich P bewegen müssen, um in gleichförmiger Bewegung in derselben Zeit denselben Weg zurückzulegen? Diese Geschwindigkeit c_1 ist wegen Gleichung (12) gegeben durch:

$$c_1 = \frac{s_1 - s_0}{t_1 - t_0} = \frac{\varphi(t_1) - \varphi(t_0)}{t_1 - t_0} \quad \ldots \quad 16)$$

Man nennt c_1 die D u r c h s c h n i t t s - g e s c h w i n d i g k e i t im Zeitraum t_0, t_1; denn unsere naive Vorstellung von der Geschwindigkeit eines Körpers sagt uns, daß die wirkliche Geschwindigkeit, falls sie nicht konstant ist, in einem Teil des Zeitraumes t_0, t_1 größer, in einem anderen kleiner sein muß, als c_1.

Wir können nun statt t_1 einen Zeitpunkt t_2 wählen, der näher an t_0 liegt als t_1. Die Durchschnittsgeschwindigkeit c_2 in diesem kleineren Zeitraum t_0, t_2 ist ist dann:

$$c_2 = \frac{\varphi(t_2) - \varphi(t_0)}{t_2 - t_0}$$

Bei den in der Natur vorkommenden ungleichförmigen Bewegungen bemerken wir nun, daß die Durchschnittsgeschwindigkeiten c_1, c_2 usw., je näher wir den Endpunkt der Zeitstrecke an dem Anfangspunkt t_0 wählen, je kleiner also der zugrunde gelegte Zeitraum ist, sich immer weniger und weniger von einem bestimmten Zahlenwert unterscheiden, der dann nur vom Zeitpunkt t_0 abhängt, und den wir die G e s c h w i n d i g k e i t des Punktes P zur Zeit t_0 nennen. Wenn diese Geschwindigkeit mit v bezeichnet wird, so schreibt man:

$$v = \lim_{t_1 = t_0} \frac{\varphi(t_1) - \varphi(t_0)}{t_1 - t_0} \quad \ldots\ldots \quad 17)$$

Das Zeichen $\lim_{t_1 = t_0}$ (limes = Grenze) bedeutet, daß man t_1 immer näher an t_0 rücken lassen und den Wert (Grenzwert) suchen muß, dem sich der Quotient bei diesem Zusammenschrumpfen der Zeitstrecke $t_1 - t_0$ immer mehr nähert.

Aus dieser allgemeinen Erklärung wird man sich vielleicht noch keine konkrete Vorstellung davon machen, wie aus dieser Definition die Geschwindigkeit wirklich berechnet wird. An einem einfachen Beispiel wird aber sofort alles klar.

Wir wählen den freien Fall im luftleeren Raum. Hier ist, wenn wir den Weg auf einer vertikalen Geraden messen:

$$s = \frac{1}{2} g t^2 \quad \ldots\ldots\ldots \quad 18)$$

Der im Zeitraum t_0, t_1 zurückgelegte Weg ist:

$$s_1 - s_0 = \frac{1}{2} g \,(t_1^2 - t_0^2)$$

daraus folgt die Durchschnittsgeschwindigkeit in diesem Zeitraum:

$$c_1 = \frac{s_1 - s_0}{t_1 - t_0} = \frac{1}{2} g(t_1 + t_0) = g t_0 + \frac{1}{2} g\,(t_1 - t_0)$$

Analog ist die Durchschnittsgeschwindigkeit c_2 in dem kleineren Zeitraum t_0, t_2

$$c_2 = g t_0 + \frac{1}{2} g (t_2 - t_0)$$

Wenn wir c_1 und c_2 vergleichen, so sehen wir, daß der erste Summand $g t_0$ beiden gemeinsam ist, im zweiten aber an Stelle von $t_1 - t_0$, der kleinere Wert $t_2 - t_0$ getreten ist. Je näher wir nun den Endpunkt dieses Zeitraumes an t_0 wählen, desto kleiner wird dieser Summand, desto näher kommt er dem Wert Null, während der erste Summand seinen Wert $g t_0$ beibehält. Es ist also,

$$\lim_{t_1 = t} \left[g t_0 + \frac{1}{2} g (t_1 - t_0)\right] = g t_0$$

Die Geschwindigkeit v ist also zur Zeit t_0 gleich $g t_0$:

$$v = g t_0 \quad \ldots\ldots\ldots \quad 19)$$

wie aus der elementaren in der Schule gelernten Mechanik bekannt ist.

Mit der Bildung der Grenzwerte:

$$\lim_{t_1 = t_0} \frac{\varphi(t_1) - \varphi(t_0)}{t_1 - t_0}$$

beschäftigt sich die Differenzialrechnung. In den Lehrbücher dieser Wissenschaft findet man die allgemeinen Regeln zu deren Berechnung. In der Bezeichnung dieser Lehre nennt man den genannten Grenzwert den Differentialquotienten der Funktion $\varphi(t)$ an der Stelle t_0. Man kann also sagen, man erhält die Geschwindigkeit, indem man die den Weg darstellende Funktion nach der Zeit differenziert und man schreibt:

$$v = \frac{ds}{dt} = \frac{d\varphi(t)}{dt} = \varphi'(t) \quad \ldots \quad 20)$$

Alle diese Schreibweisen bedeuten dasselbe. Man drückt ihre Aussage auch kurz so aus: Die Geschwindigkeit ist der Differentialquotient des Weges nach der Zeit. Wer differenzieren kann, kann auch zu jeder vorgelegten Bewegungsgleichung die Geschwindigkeit bilden.

Wenn die Bewegung eine schwingende und durch:

$$s = \sin \frac{2\pi}{T} t$$

gegeben ist, so lautet die Geschwindigkeit zur Zeit t:

$$v = \frac{ds}{dt} = \frac{d}{dt} \sin \frac{2\pi}{T} t = \cos \frac{2\pi}{T} t \frac{d}{dt} \frac{2\pi}{T} t$$

$$= \frac{2\pi}{T} \cos \frac{2\pi}{T} t$$

Man kann sich den Uebergang von der Durchschnittsgeschwindigkeit zu ihrem Grenzwert folgendermaßen anschaulich machen: Den zeitlichen Verlauf der Bewegung versinnbildlichen wir uns durch ein sogenanntes **Zeit-Wegdiagramm.** Zu diesem Zwecke ziehen wir uns eine t-Achse und senkrecht dazu eine s-Achse. Jede Kurve $s = \varphi(t)$ in der Ebene dieser Achsen ordnet jedem Zeitpunkt t einen Weg s zu, stellt daher eine Bewegung in einer Geraden dar. Ist speziell die Bewegung eine gleichförmige, so ist die **Zeitwegkurve** eine Gerade $s = ct$. Seien nun t_0, s_0 bzw. t_1, s_1 die Koordinaten zweier Punkte der Kurve; ihre Verbindungslinie, eine Sehne der Kurve, schließt dann einen Winkel mit der t-Achse ein, dessen trigonometrische Tangente $\frac{s_1 - s_0}{t_1 - t_0}$ ist, also die Durchschnittsgeschwindigkeit im Zeitraum t_0, t_1. Rückt nun t_1 gegen t_0, so nähert sich die Sehne immer mehr der Kurventangente in t_0. Und die trigonometrische Tangente des Neigungswinkels der Sehne geht in die des Neigungswinkels der Kurventangente über. Die Geschwindigkeit im Punkte t_0 ist also gleich der trigonometrischen Tangente des Neigungswinkels der Kurventangente im Punkte t_0, s_0 der Zeitwegkurve.

7. Beliebige ungleichförmige Bewegung. Der Punkt P möge sich jetzt nach einem beliebigen Gesetz auf einer beliebigen Kurve bewegen. Die Bewegungsgleichungen

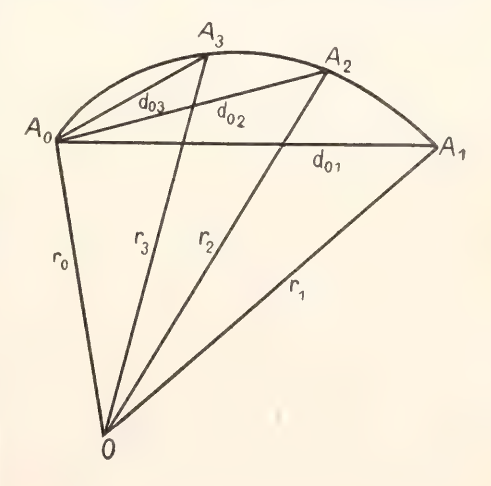


Fig. 3.

seien durch (3) gegeben. Zur Zeit $t = t_0$ befinde sich P in A_0 und habe die Koordinaten:

$$x_0 = \varphi(t_0), \; y_0 = \chi(t_0), \; z_0 = \psi(t_0),$$

bezw. den Lagevektor:

$$\mathfrak{r}_0 = \mathfrak{p}(t_0) \quad \text{(vgl. Gleichung 4)}$$

Zur Zeit t_1 befinde sich P in A_1 und es hat der Lagevektor den Wert:

$$\mathfrak{r}_1 = \mathfrak{p}(t_1)$$

Die Verschiebung in dem Zeitraum beträgt: $\mathfrak{r}_1 - \mathfrak{r}_0$, wir schreiben (vgl. Gleichung 8):

$$\mathfrak{r}_1 - \mathfrak{r}_0 = \mathfrak{d}_{01} \qquad \text{(vgl. Fig. 3)}$$

Wir nennen

$$\mathfrak{v}_1 = \frac{\mathfrak{d}_{01}}{t_1 - t_0} = \frac{\mathfrak{r}_1 - \mathfrak{r}_0}{t_1 - t_0}$$

die durchschnittliche Verschiebungsgeschwindigkeit im Zeitraum t_0, t_1; es ist die Geschwindigkeit, mit der P sich geradlinig gleichförmig bewegen müßte, um in der Zeit $t_1 - t_0$ von A_0 nach A_1 zu gelangen. Sie ist ein Vektor, dessen Richtung und Sinn durch die der Verschiebung $\mathfrak{d}_{01}$ gegeben ist. Wenn nun t_1 gegen t_0 rückt, also nach und nach in t_2, t_3 usw. übergeht, so geht A_1 in A_2, A_3 usw. über (Fig. 3) und die durchschnittliche Verschiebungsgeschwindigkeit nähert sich ähnlich wie die durchschnittliche Geschwindigkeit bei der geradlinigen Bewegung (§ 6) in den praktisch vorkommenden Fällen einem Grenzwert; die Richtung der Verschiebung, die ja Sehne der Kurve ist, geht dabei in die Richtung der Kurventangente über. Es geht also die durchschnittliche Verschiebungsgeschwindigkeit, wenn wir sie für immer kleiner und kleinere Werte berechnen, in einen Vektor $\mathfrak{v}$ über, der die Richtung der Kurventangente in A_0 hat. Diesen Vektor:

$$\mathfrak{v} = \lim_{t_1 = t_0} \frac{\mathfrak{r}_1 - \mathfrak{r}_0}{t_1 - t_0} = \lim_{t_1 = t_0} \frac{\mathfrak{d}_{01}}{t_1 - t_0} \quad . \; . \quad 21)$$

nennt man den G e s c h w i n d i g k e i t s v e k t o r zur Zeit $t = t_0$. Wenn wir das Zeichen $\sim$ für „näherungsweise gleich" einführen, können wir auch schreiben:

$$\mathfrak{v}(t_0) \sim \frac{\mathfrak{r}_1 - \mathfrak{r}_0}{t_1 - t_0} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 22)$$

$$\text{oder} \quad \mathfrak{r}_1 \sim \mathfrak{r}_0 + \mathfrak{v}(t_0)(t_1 - t_0) \quad . \; . \; . \; . \quad 23)$$

Dabei bedeutet in $\mathfrak{v}(t_0)$ die Klammer eine funktionelle Abhängigkeit, „Geschwindigkeit zur Zeit t_0, nicht aber ein Produkt.

Und zwar gilt diese Gleichung um so genauer, je kleiner das Zeitintervall $t_1 - t_0$ ist. Nach ihr läßt sich die Lage von P zur Zeit t_1 aus der Lage zur Zeit t_0 und dem Geschwindigkeitsvektor berechnen. Es wird einfach zu Lagevektor $\mathfrak{r}_0$ der mit dem Zeitintervall $t_1 - t_0$ multiplizierte Geschwindigkeitsvektor nach den Regeln der Vektoraddition addiert. Die Vektorgleichung (22) können wir durch die drei Gleichungen zwischen den Komponenten der Vektoren nach den Koordinatenachsen ersetzen. Die Komponenten des Geschwindigkeitsvektors seien $\mathfrak{v}_x$, $\mathfrak{v}_y$, $\mathfrak{v}_z$; die Komponenten der Verschiebung im Zeitraum $t_1 - t_0$ sind: $x_1 - x_0$, $y_1 - y_0$, $z_1 - z_0$; es gilt also:

$$\mathfrak{v}_x \sim \frac{x_1 - x_0}{t_1 - t_0}, \quad \mathfrak{v}_y \sim \frac{y_1 - y_0}{t_1 - t_0}, \quad \mathfrak{v}_z \sim \frac{z_1 - z_0}{t_1 - t_0} \quad 24)$$

oder auch wegen Gl. (3):

$$\mathfrak{v}_x \sim \frac{\varphi(t_1) - \varphi(t_0)}{t_1 - t_0} \text{ usw.} \quad . \; . \; . \quad 25)$$

Wenn wir nun wirklich t_1 gegen t_0 rücken lassen und den Grenzwert berechnen, so werden aus den Näherungsgleichungen exakte Gleichungen und wir erhalten:

$$\mathfrak{v}_x = \lim_{t_1 = t_0} \frac{\varphi(t_1) - \varphi(t_0)}{t_1 - t_0},$$

$$\mathfrak{v}_y = \lim_{t_1 = t_0} \frac{\chi(t_1) - \chi(t_0)}{t_1 - t_0} \quad . \; . \; . \; . \; . \quad 26)$$

$$\mathfrak{v}_z = \lim_{t_1 = t_0} \frac{\psi(t_1) - \psi(t_0)}{t_1 - t_0}.$$

Diese Grenzwerte lassen sich nun in der Sprache der Differentialrechnung schreiben:

$$\mathfrak{v}_x = \frac{d\varphi(t)}{dt} = \frac{dx}{dt}, \quad \mathfrak{v}_y = \frac{d\chi(t)}{dt} = \frac{dy}{dt},$$

$$\mathfrak{v}_z = \frac{d\psi(t)}{dt} = \frac{dz}{dt} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 27)$$

daraus folgt für die Länge des Vektors:

$$|\mathfrak{v}| = \sqrt{\mathfrak{v}_x^2 + \mathfrak{v}_y^2 + \mathfrak{v}_y^2} =$$

$$\sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2} \quad . \; . \; . \quad 28)$$

und für die Winkel α, β, γ, die $\mathfrak{v}$, also auch die Tangente der Bahnkurve, mit den Achsen einschließt:

$$\cos\alpha = \frac{\frac{dx}{dt}}{|\mathfrak{v}|}, \quad \cos\beta = \frac{\frac{dy}{dt}}{|\mathfrak{v}|}, \quad \cos\gamma = \frac{\frac{dz}{dt}}{|\mathfrak{v}|} \quad . \; . \quad 29)$$

Man kann also aus den Bewegungsgleichungen (3) durch Differenzieren den Geschwindigkeitsvektor berechnen.

Wenn wir uns den ganzen Bewegungsverlauf durch die Zeitpunkte $t_0, t_1, t_2 \ldots t_n$ in sehr kleine Zeitabschnitte zerlegt denken und wir den Geschwindigkeitsvektor $\mathfrak{v}_0, \mathfrak{v}_1, \mathfrak{v}_2 \ldots \mathfrak{v}_{n-1}$ in den ersten n—1 dieser Zeitpunkte kennen, so läßt sich der Lagevektor $\mathfrak{r}_n$ zur Zeit t_n aus dem zur Zeit t_0, der $\mathfrak{r}_0$ heiße, durch wiederholte Anwendung der Gleichung (23) näherungsweise berechnen:

$$\mathfrak{r}_n = \mathfrak{r}_0 + \mathfrak{v}_0(t_1 - t_0) + \mathfrak{v}_1(t_2 - t_1) + \ldots$$

$$+ \mathfrak{v}_{n-1}(t_n - t_{n-1}) = \mathfrak{r}_0 + \sum_0^{n-1}{}^i \mathfrak{v}_i (t_{i+1} - t_i) \quad 30)$$

Auch die in Gleichung 30 auftretende Summe nähert sich, wenn wir das Zeitintervall t_0 bis t_n in immer kleinere und kleinere Zeitstrecken teilen, wie in der I n t e g r a l r e c h n u n g gezeigt wird, einem Grenzwert, und wir schreiben in der Symbolik dieser Rechnung:

$$\mathfrak{r}_n = \mathfrak{r}_0 + \int_{t_0}^{t_n} \mathfrak{v}\,dt \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 31)$$

Wenn wir diese Vektorgleichung in Komponenten zerlegen, so wird daraus:

$$x_n = x_0 + \int_{t_0}^{t_n} \mathfrak{v}_x dt, \text{ usw.} \qquad 32)$$

Man kann sich den Verlauf der Aenderung des Geschwindigkeitsvektors bei einer bestimmten Bewegung von P dadurch veranschaulichen, daß man zu der Bewegung von P eine Bewegung eines Punktes P′ konstruiert, dessen Lagevektor zu jeder Zeit t dem Geschwindigkeitsvektor von P nach Länge, Richtung und Sinn gleich ist. Diese Bewegung von P′ die uns ein Bild der Geschwindigkeitsänderungen bei der Bewegung des Punktes P liefert, nennt man den zur Bewegung von P gehörenden Hodographen. Man sieht leicht: Falls die Bewegung von P geradlinig und gleichförmig ist, so ist sein Geschwindigkeitsvektor immer nach Länge und Richtung konstant; also auch der Lagevektor von P′; der Hodograph besteht also aus einem einzigen Punkt, P′ bleibt in Ruhe. Falls die Bewegung von P geradlinig ist, aber ungleichförmig, so behält $\mathfrak{v}$ seine Richtung bei, seine Länge wechselt aber; dasselbe tut der Lagevektor von P′, weshalb sich dieser Punkt auch längs einer Geraden bewegen muß.

8. Begriff der Beschleunigung. Wenn der Geschwindigkeitsvektor im Laufe der Bewegung sich nach Länge oder Richtung ändert, so nennt man das Maß dieser Änderung die Beschleunigung der Bewegung. Dieser wissenschaftliche Begriff deckt sich nicht ganz mit dem, was man im gewöhnlichen Leben Beschleunigung nennt. Wenn etwa ein Punkt P sich längs eines Kreises mit konstanter Geschwindigkeit bewegt, wird der gewöhnliche Sprachgebrauch sagen, es sei keine Beschleunigung vorhanden. Der wissenschaftliche hingegen, der nicht nur die Aenderung des Betrages, sondern auch der Richtung einer Geschwindigkeit in Rechnung zieht, spricht auch hier von Beschleunigung.

Die Aenderung des Geschwindigkeitsvektors von P ist aber identisch mit der Aenderung des Lagevektors von P′ beim Hodographen (Abschnitt 7). Wir verstehen demgemäß unter dem Beschleunigungsvektor des Punktes P nichts anderes als den Geschwindigkeitsvektor des Punktes P′ (des Hodographen der ursprünglichen Bewegung) im betreffenden Zeitpunkt. Der Beschleunigungsvektor $\mathfrak{w}$ wird also aus dem Geschwindigkeitsvektor $\mathfrak{v}$ genau so berechnet, wie dieser aus dem Lagevektor $\mathfrak{r}$, da ja $\mathfrak{v}$ der Lagevektor, $\mathfrak{w}$ der Geschwindigkeitsvektor der Hodographenbewegung ist.

Es gelten also analog den Formeln (22) und (23) hier die Formeln:

$$\mathfrak{w}(t_0) \sim \frac{\mathfrak{v}_1 - \mathfrak{v}_0}{t_1 - t_0} \quad . \; . \; . \; . \; 33)$$

$$\mathfrak{v}_1 \sim \mathfrak{v}_0 + \mathfrak{w}(t_0)(t_1 - t_0) \quad . \; . \; . \; 34)$$

Dabei ist unter $\mathfrak{w}(t_0)$ wieder die „Beschleunigung zur Zeit t_0" zu verstehen.

Nach Gleichung (34) läßt sich der Geschwindigkeitsvektor zur Zeit t_1 aus dem zur Zeit t_0 annähernd berechnen, wenn man den Beschleunigungsvektor zu dieser Zeit kennt.

Auch für die Komponenten $\mathfrak{w}_x$, $\mathfrak{w}_y$, $\mathfrak{w}_z$ des Beschleunigungsvektors gelten die den Gleichungen (26) analogen:

$$\left.\begin{aligned} \mathfrak{w}_x &= \lim_{t_1 = t_0} \frac{\mathfrak{v}_x(t_1) - \mathfrak{v}_x(t_0)}{t_1 - t_0} \\ \mathfrak{w}_y &= \lim_{t_1 = t_0} \frac{\mathfrak{v}_y(t_1) - \mathfrak{v}_y(t_0)}{t_1 - t_0} \\ \mathfrak{w}_z &= \lim_{t_1 = t_0} \frac{\mathfrak{v}_z(t_1) - \mathfrak{v}_z(t_0)}{t_1 - t_0} \end{aligned}\right\} \; . \; . \; 35)$$

In der Sprache der Differentialrechnung lassen sich diese Grenzwerte schreiben:

$$\mathfrak{w}_x = \frac{d\mathfrak{v}_x}{dt}, \quad \mathfrak{w}_y = \frac{d\mathfrak{v}_y}{dt}, \quad \mathfrak{w}_z = \frac{d\mathfrak{v}_z}{dt} \; . . 36)$$

und wenn wir für die $\mathfrak{v}_x$, $\mathfrak{v}_y$, $\mathfrak{v}_z$ ihre durch Gleichung (27) gegebenen Werte einsetzen:

$$\mathfrak{w}_x = \frac{d^2\varphi(t)}{dt^2} = \frac{d^2x}{dt^2}, \quad \mathfrak{w}_y = \frac{d^2\chi(t)}{dt^2} = \frac{d^2y}{dt^2},$$

$$\mathfrak{w}_z = \frac{d^2\psi(t)}{dt^2} = \frac{d^2z}{dt^2} \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; 37)$$

Die Komponenten des Beschleunigungsvektors erhält man also, indem man die Bewegungsgleichungen zweimal nach der Zeit differenziert.

Die Länge von $\mathfrak{w}$ beträgt:

$$|\mathfrak{w}| = \sqrt{\mathfrak{w}_x^2 + \mathfrak{w}_y^2 + \mathfrak{w}_z^2} =$$

$$= \sqrt{\left(\frac{d^2x}{dt^2}\right)^2 + \left(\frac{d^2y}{dt^2}\right)^2 + \left(\frac{d^2z}{dt^2}\right)^2}$$

Man nennt $|\mathfrak{w}|$ den Betrag der Beschleunigung. Für die Winkel, λ, μ, ν, die $\mathfrak{w}$ mit den Achsen einschließt, gilt:

$$\cos\lambda = \frac{\mathfrak{w}_x}{|\mathfrak{w}|}, \; \cos\mu = \frac{\mathfrak{w}_y}{|\mathfrak{w}|}, \; \cos\nu = \frac{\mathfrak{w}_z}{|\mathfrak{w}|} \; . . 39)$$

Ebenso gilt analog Gleichung (30):

$$\mathfrak{v}_n \sim \mathfrak{v}_0 + \mathfrak{w}_0(t_1 - t_0) + \mathfrak{w}^1(t_2 - t_1) + \ldots + \ldots 40)$$

$$+ \mathfrak{w}_{n-1}(t_n - t_{n-1}) = \mathfrak{v}_0 + \sum_0^{n-1} i \, \mathfrak{w}_i(t_{i+1} - t_i)$$

Dabei bedeutet immer $\mathfrak{w}_i$ soviel wie „Beschleunigung zur Zeit t_i". Diese Formel läßt sich in der Symbolik der Integralrechnung schreiben:

$$\mathfrak{v}_n = \mathfrak{v}_0 + \int_{t_0}^{t_n} \mathfrak{w} dt \; . \; . \; . \; . \; . \; 41)$$

Die einfachste Art der beschleunigten Bewegung ist die gleichförmig beschleunigte. Darunter versteht man eine Bewegung von P, bei der die Hodographenbewegung eine gleichförmig gerad-

linige ist. Es stehen also bei der gleichförmig beschleunigten Bewegung $\mathfrak{w}$ und $\mathfrak{v}$ in derselben Beziehung wie $\mathfrak{v}$ und $\mathfrak{r}$ bei der gleichförmig geradlinigen. Es ist infolgedessen der Beschleunigungsvektor $\mathfrak{w}$ nach Richtung und Länge konstant. Und die Beziehungen:

$$\mathfrak{v} = \mathfrak{w}t, \mathfrak{w} = \frac{\mathfrak{v}}{t}, t = \frac{\mathfrak{v}}{\mathfrak{w}} \quad . \quad . \quad 42)$$

bestehen analog den Beziehungen (9), (10), (11) bei der gleichförmig geradlinigen Bewegung. Wir können daher auch sagen: bei der gleichförmig beschleunigten Bewegung nimmt die Geschwindigkeit $\mathfrak{v}$ in gleichen Zeiten um den gleichen Betrag zu und die Richtung der Geschwindigkeit bleibt fortwährend die gleiche, also ist die Bahn eine Gerade. Bei den Formeln (42) ist vorausgesetzt, daß die Geschwindigkeit zur Zeit $t=0$ den Wert Null hatte.

Ist die Geschwindigkeit zur Zeit $t = 0$ gleich $\mathfrak{v}_0$, so folgt aus Gleichung (33) und (40)

$$\mathfrak{w} = \frac{\mathfrak{v}-\mathfrak{v}_0}{t}$$

(In Gleichung (40) sind nämlich $\mathfrak{w}_1 = \mathfrak{w}_2 = \ldots = \mathfrak{w}_{n-1} = \mathfrak{w}$ zu setzen). Oder auch:

$$\mathfrak{v} = \mathfrak{v}_0 + \mathfrak{w}t \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 43)$$

Ein Beispiel für die gleichförmig beschleunigte Bewegung bietet der freie Fall der Körper im luftleeren Raum.

In der Sprache der Differentialrechnung schreibt man, wenn der Körper sich in irgendeiner Richtung, auf der die Weglänge durch s gemessen wird, mit der konstanten Beschleunigung g bewegt:

$$\frac{d^2s}{dt^2} = g$$

Daraus folgt durch einmalige Integration:

$$\frac{ds}{dt} = gt + C$$

wo C eine aus dem Anfangswort von $\frac{ds}{dt}$ zu bestimmende Konstante ist; soll für $t = 0$ die Geschwindigkeit $\frac{ds}{dt}$ den gegebenen Wert $\mathfrak{v}_0$ haben, so wird $C = \mathfrak{v}_0$ und wir erhalten:

$$\frac{ds}{dt} = gt + \mathfrak{v}_0 . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 44)$$

also die Formel (43), da ja $\frac{ds}{dt} = \mathfrak{v}$ und $g = \mathfrak{w}$ ist.

Nicht so ganz einfach ist es, ohne Hilfe der höheren Mathematik den in t Zeiteinheiten bei einer gleichförmig beschleunigten Bewegung zurückgelegten Weg zu berechnen. Eine annähernde Berechnung gestattet Gleichung (30); da die Bewegung in einer Geraden erfolgt, mißt ja der Lagevektor $\mathfrak{r}$ den zurückgelegten Weg. Wir wollen etwa $\mathfrak{r}_0 = 0$, $t_0 = 0$ setzen, d. h. den Koordinatenursprung und den Zeitanfang mit dem Beginn der Bewegung zusammenfallen lassen. Nun ist wegen Gleichung (42):

$$\mathfrak{v}_0 = \mathfrak{w}t_0 = 0, \mathfrak{v}_1 = \mathfrak{w}t_1, \mathfrak{v}_2 = \mathfrak{w}t_2, \ldots \mathfrak{v}_{n-1} = \mathfrak{w}t_{n-1},$$

daher:

$$\mathfrak{r}_n \sim \mathfrak{w}t_1 . (t_2-t_1) + \mathfrak{w}t_2 (t_3-t_2) + \mathfrak{w}t_3 (t_4-t_3) + \ldots \mathfrak{w}t_{n-1} (t_n - t_{n-1})$$

Wir machen jetzt die zwischen 0 und t_n eingeschaltenen Zeitintervalle alle gleich einer und derselben Größe T, also:

$$T = \frac{t_n}{n} = t_1 = t_2-t_1 = t_3-t_2 \ldots$$

$$t_k = kT = \frac{kt_n}{n},$$

dann ist:

$$\mathfrak{r}_n \sim \frac{\mathfrak{w}t_n^2}{n^2}(1+2+\ldots(n-1)) = \mathfrak{w}t_n^2 \frac{(n-1)n}{2n^2} = \frac{\mathfrak{w}}{2} t_n^2 \frac{n-1}{n}.$$

Der in der Zeit t zurückgelegte Weg ist also annähernd durch:

$$\frac{\mathfrak{w}}{2} t^2 \frac{n-1}{n}$$

gegeben, die Annäherung ist um so besser, je größer die Anzahl der Intervalle n ist, in die wir die Zeit t teilen; je größer aber n ist, desto weniger ist $\frac{n-1}{n}$ von 1 verschieden; wir werden also den Weg genau erhalten, wenn wir an Stelle von $\frac{n-1}{n}$ den Wert 1 setzen. Also:

$$s = \frac{\mathfrak{w}}{2} t^2 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 45)$$

Wenn wir für $\mathfrak{w}$ die Beschleunigung g der frei fallenden Körper einsetzen, erhalten wir:

$$s = \frac{g}{2} t^2 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 45a)$$

Und dies ist die bekannte Galileische Formel für den beim freien Fall im luftleeren Raum zurückgelegten Weg in der Zeit t. Ebenso erhalten wir für die Endgeschwindigkeit v nach t Zeiteinheiten, indem wir in Gl. 44 die Anfangsgeschwindigkeit $\mathfrak{v}_0 = 0$ setzen:

$$v = gt \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 44a)$$

Viel leichter als durch die obigen Summenbildungen erhalten wir die Formel für den Weg mit Hilfe der Integralrechnung. Wenn wir Gleichung (44) nochmals integrieren, erhalten wir:

$$s = \frac{g}{2} t^2 + \mathfrak{v}_0 t + C'$$

Soll für $t = 0$ auch $s = 0$ sein, so wird $C' = 0$ und:

$$s = \frac{g}{2} t^2 + \mathfrak{v}_0 t \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 46)$$

das ist die Formel für den Weg, wenn eine Anfangsgeschwindigkeit $\mathfrak{v}_0$ gegeben ist. Für $\mathfrak{v}_0 = 0$ folgt wieder Gleichung (45a).

Eine weitere sehr einfache Form der beschleunigten Bewegung ist die Bewegung des Punktes P mit konstanter Geschwindigkeit längs eines Kreises vom Radius r. Hier ändert sich die Geschwindigkeit nur der Richtung nach. Ihr Betrag habe den konstanten Wert v. Also ist der Hodograph ein

Kreis, da ja sein Lagevektor gleich dem Geschwindigkeitsvektor $\mathfrak{v}$ ist, also einem Vektor von konstanter Länge; während P den Kreis mit dem Radius r durchläuft, durchläuft P′ den Hodographenkreis mit dem Radius v; die Umlaufszeit T ist bei beiden dieselbe; sie wird erhalten, indem man die Länge des Kreisumfangs durch die Geschwindigkeit dividiert. Das ergibt für den Punkt P:

$$T = \frac{2\pi r}{v} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 47)$$

Die Geschwindigkeit der Hodographenbewegung sei w, also gilt auch

$$T = \frac{2\pi v}{w} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 48)$$

Durch Gleichsetzung von (47) und (48) finden wir:

$$w = \frac{v^2}{r} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 49)$$

w ist die Geschwindigkeit der Hodographenbewegung, also die Beschleunigung der Kreisbewegung von konstanter Geschwindigkeit v längs des Kreises mit dem Radius r. Die Richtung des Beschleunigungsvektors $\mathfrak{w}$ ist senkrecht zur Tangente des Kreises, d. h. zum Geschwindigkeitsvektor $\mathfrak{v}$; denn letzterer ist parallel dem Radius, ersterer der Tangente des Hodographenkreises; daher ist $\mathfrak{w}$ stets gegen das Zentrum des von P durchlaufenen Kreises gerichtet.

Bei einer beliebigen Bewegung läßt sich der Beschleunigungsvektor $\mathfrak{w}$ in eine Komponente in der Richtung der Tangente und in eine Komponente in der dazu senkrechten Richtung zerlegen. Man spricht von der T a n g e n t i a l b e s c h l e u n i g u n g und der N o r m a l - oder Z e n t r i p e t a l b e s c h l e u n i g u n g. Bei der gleichförmigen Kreisbewegung existiert, wie wir gesehen haben, nur Normalbeschleunigung; beim freien Fall, wo der Beschleunigungsvektor immer die Richtung der Bahn hatte, ist, wie bei jeder geradlinigen Bewegung, nur eine Tangentialbeschleunigung vorhanden. Der Wert der Zentripetalbeschleunigung läßt sich übrigens ganz allgemein angeben. Wenn P sich beliebig bewegt, so können wir einen Kreis durch seine Lage zur Zeit t ziehen, der sich möglichst gut an die Bahnkurve anschmiegt. Der Radius r dieses Kreises heißt der Krümmungsradius der Bahnkurve im betrachteten Punkt. Dann können wir die wirkliche Bewegung in der Umgebung dieses Punktes durch eine gleichförmige Kreisbewegung mit der augenblicklichen Geschwindigkeit v ersetzen; diese hat aber die Normalbeschleunigung:

$$\mathfrak{w}_n = \frac{v^2}{r} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 50)$$

Die wirkliche Bewegung unterscheidet sich in der Umgebung des Punktes von der fingierten nur durch das Vorhandensein einer Tangentialbeschleunigung.

9. Flächengeschwindigkeit. Während der Bewegung von P beschreibt der von O aus gezogene Lagevektor $\mathfrak{r}$ eine gewisse Fläche. Wenn wir die Zeit der Bewegung genügend klein wählen, können wir diese Fläche als eben betrachten, und zwar als ein Dreieck OA_1A_2, wo A_1 und A_2 die Lagen von P zu den Zeiten t_1 und t_2 sind. Die Seiten des Dreiecks sind die Lagevektoren $\mathfrak{r}_1$, $\mathfrak{r}_2$ und die Verschiebung $\mathfrak{d}_{12} = \mathfrak{r}_2 - \mathfrak{r}_1$ (s. Fig. 2) Der Flächeninhalt des Dreiecks sei f_{12}, dann nennen wir:

$$\frac{f_{12}}{t_2 - t_1}$$

die durchschnittliche Flächengeschwindigkeit im Zeitraum t_1, t_2 und:

$$f = \lim_{t_1 = t_2} \frac{f_{12}}{t_2 - t_1} \quad . \quad . \quad . \quad 53)$$

die Flächengeschwindigkeit im Zeitpunkt t_1.

Man betrachtet auch den Vektor $\mathfrak{f}$ der Flächengeschwindigkeit und versteht darunter einen Vektor, dessen Betrag die durch Gleichung (53) gegebene Zahl f ist, dessen Richtung senkrecht auf der Ebene von $\mathfrak{r}_1$ und $\mathfrak{r}_2$ steht und dessen Pfeil dorthin zeigt, woher gesehen die Drehung von $\mathfrak{r}_1$ nach $\mathfrak{r}_2$ im Sinne des Uhrzeigers erfolgt. Wenn A_1 die Koordinaten x_1, y_1, z_1 hat, und A_2 die Koordinaten x_2, y_2, z_2, so sind nach der analytischen Geometrie die Komponenten f_x, f_y, f_z von $\mathfrak{f}$ gegeben durch:

$$2 f_x = \frac{y_1 z_2 - y_2 z_1}{t_2 - t_1}, \quad 2 f_y = \frac{z_1 x_2 - z_2 x_1}{t_2 - t_1},$$

$$2 f_z = \frac{x_1 y_2 - x_2 y_1}{t_2 \quad t_1}$$

oder, wie sich durch Umformung ergibt:

$$2 f_x = y_1 \frac{z_2 - z_1}{t_2 - t_1} - z_1 \frac{y_2 - y_1}{t_2 - t_1},$$

$$2 f_y = z_1 \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} - x_1 \frac{z_2 - z_1}{t_2 - t_1} \quad . \quad . \quad 54)$$

$$2 f_z = x_1 \frac{y_2 - y_1}{t_2 - t_1} - y_1 \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1};$$

daraus folgt wegen Gleichung (24):

$$2 f_x \sim y\,\mathfrak{v}_z - z\,\mathfrak{v}_y, \quad 2 f_y \sim z\,\mathfrak{v}_x - x\,\mathfrak{v}_z,$$

$$2 f_z \sim x\,\mathfrak{v}_y - y\,\mathfrak{v}_x \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 55)$$

Wenn wir nun zur Grenze übergehen, indem wir das Zeitintervall t_1, t_2 sich der Null nähern lassen, gehen die näherungsweise giltigen Gleichungen (55) in streng richtige über.

In der Sprache der Differentialrechnung schreibt man:

$$2 f = y \frac{dz}{dt} - z \frac{dy}{dt}, \quad 2 f_y = z \frac{dx}{dt} - x \frac{dz}{dt}$$

$$2 f_z = x \frac{dy}{dt} - y \frac{dx}{dt} \quad 56)$$

Und in der Sprache der Vektoranalysis heißt es einfach:

$$2\,\mathfrak{f} = [\mathfrak{r}\,\mathfrak{v}] \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 57)$$

10. Zusammensetzung von Bewegungen. Ein Punkt P führe in bezug auf einen Bezugskörper K_1 eine bestimmte durch die Gleichungen

$$x = \varphi_1(t), \quad y = \chi_1(t), \quad z = \psi_1(t)$$

gegebene Bewegung aus. Der Bezugskörper K_1 bewege sich nun selbst in bezug auf einen anderen Körper K_2, und zwar sei seine Bewegung eine sogenannte translatorische, d. h. alle substantiellen Punkte von K_1 sollen parallele Bahnen mit einer gemeinsamen Geschwindigkeit in bezug auf K_2 beschreiben. Es genügt also, die Bewegung eines einzigen substantiellen Punktes von K_1 zu geben. Als solchen wählen wir einen Punkt O_1 in K_1, von dem aus wir uns ein Achsensystem x_1, y_1, z_1 gezogen denken. Die Bewegung von O_1 in bezug auf ein in K_2 festes Koordinatensystem (O_2, x_2, y_2, z_2) sei gegeben durch:

$$x = \varphi_2(t),\ y = \chi_2(t),\ z = \psi_2(t);$$

dabei sollen die Achsen x_1, x_2 bezw. y_1, y_2, z_1, z_2 einander parallel sein. Dann ist die Bewegung von P in bezug auf K_2 offenbar gegeben durch:

$$x = \varphi_1(t) + \varphi_2(t),\ y = \chi_1(t) + \chi_2(t),$$
$$z = \psi_1(t) + \psi_2(t).$$

Ist $\mathfrak{r}_1$ der Lagevektor von P in bezug auf O_1, $\mathfrak{r}_2$ der von O_1 in bezug auf O_2, so ist offenbar:

$$\mathfrak{r} = \mathfrak{r}_1 + \mathfrak{r}_2$$

der Lagevektor von P in bezug auf O_2, d. h. wir erhalten den Lagevektor in bezug auf O_2 als Diagonale eines Parallelogramms, dessen Seiten $\mathfrak{r}_1$ und $\mathfrak{r}_2$ sind.

Wir nennen nun die Bewegung $\mathfrak{r}_1 + \mathfrak{r}_2$ die resultierende der Bewegungen $\mathfrak{r}_1$ und $\mathfrak{r}_2$; dies ist der rein kinematische Sinn der Zusammensetzung zweier Bewegungen; es ist nichts anderes als die Beschreibung in bezug auf einen anderen Bewegungskörper. Man nennt aber nun weiter, ohne an irgendeinen zweiten Bewegungskörper zu denken, eine Bewegung $\mathfrak{r}$, die sich in zwei Summanden $\mathfrak{r}_1 + \mathfrak{r}_2$ zerlegen läßt, wo sich also ein solcher zweiter Bewegungskörper einschalten ließe, eine aus $\mathfrak{r}_1$ und $\mathfrak{r}_2$ zusammengesetzte oder resultierende Bewegung. Man kann natürlich so jede Bewegung auf unendlich viele Arten in Bewegungen zerlegen, aus denen sie sich auf die geschilderte Art zusammensetzen läßt.

Wie der Lagevektor der zusammengesetzten Bewegung die Vektorsumme aus den Lagevektoren der einzelnen Bewegungen ist, so folgt auch aus der Definition des Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvektors, daß diese bei einer zusammengesetzten Bewegung die Summe aus den Geschwindigkeits- bezw. Beschleunigungsvektoren der Einzelbewegungen sind. Man nennt diesen Satz wegen der geometrischen Konstruktion der Vektorsumme den Satz vom Parallelogramm der Geschwindigkeiten bezw. Beschleunigungen und bezeichnet die Geschwindigkeit (bezw. Beschleunigung) der zusammengesetzten Bewegung als die resultierende Geschwindigkeit (bei Beschleunigung) die der einzelnen Bewegungen als Komponenten der Geschwindigkeit (bezw. Beschleunigung).

So ist z. B. schon durch das Anschreiben der Bewegungsgleichungen in der Form

$$x = \varphi(t),\ y = \chi(t),\ z = \psi(t)$$

jede Bewegung in drei zerlegt, von denen jede einzelne eine geradlinige Bewegung ist. Die Geschwindigkeiten dieser drei Bewegungen sind $\mathfrak{v}_x$, $\mathfrak{v}_y$, $\mathfrak{v}_z$, die Komponenten des Geschwindigkeitsvektors; ebenso die Beschleunigungen.

Ein Beispiel für die Zerlegung einer Bewegung ist die Auffassung der in schlingenförmigen Kurven vor sich gehenden scheinbaren Planetenbewegung als zusammengesetzt aus der Kreisbewegung eines fingierten Körpers um die Erde und einer Kreisbewegung des Planeten um diesen fingierten Körper.

Eine komplizierte Bewegung läßt sich oft in mehrere Bewegungen zerlegen, von denen jede einzelne in einfache Gesetze faßbar ist. Ein sehr wichtiges Beispiel dafür ist die Wurfbewegung. Ein Punkt P werde mit der Anfangsgeschwindigkeit c schief nach aufwärts geworfen; die Geschwindigkeitsrichtung schließe den Winkel α (Elevationswinkel) mit der Horizontalen ein. Dann ist die Bewegung von P zusammengesetzt aus einer gleichförmigen Bewegung mit der Geschwindigkeit c in der anfänglichen Geschwindigkeitsrichtung und einer gleichförmig beschleunigten vertikal nach abwärts gerichteten Bewegung.

Die Bewegungsgleichungen der ersteren sind, wenn wir die y-Achse vertikal nach aufwärts, die x-Achse horizontal ziehen:

$$x = ct \cos \alpha, \quad y = ct \sin \alpha \qquad \text{(s. Gleichung 13)}$$

Die Gleichung der beschleunigten Bewegung ist, wenn g die Beschleunigung ist:

$$x = 0,\ y = -\frac{g}{2} t^2 \qquad \text{(s. Gleichung 45)}$$

Das Zeichen — rührt davon her, daß die Bewegung in der Richtung nach abwärts, also der negativen y-Richtung beschleunigt wird.

Also ist die resultierende Wurfbewegung gegeben durch:

$$x = ct \cos \alpha, \quad y = ct \sin \alpha - \frac{g}{2} t^2 \ \ldots . 58)$$

Die horizontalen und vertikalen Komponenten der Geschwindigkeit sind dann (nach Gleichung 14 und 44 a) gegeben durch:

$$\mathfrak{v}_x = c \cos \alpha, \qquad \mathfrak{v}_y = c \sin \alpha - gt \ \ldots 59)$$

Man kann (59) durch Differenzieren von (58) erhalten.

Der Punkt P fliegt so lange nach aufwärts, als $\mathfrak{v}_y$ noch positiv ist. Das hört auf, wenn $\mathfrak{v}_y = 0$ wird, also:

$$t = \frac{c \sin \alpha}{g} \quad . \ . \ . \ . \quad 60)$$

Wenn wir diesen Wert von t in die Formel (58) für y, die Vertikalkomponente des Lagevektors, einsetzen, erhalten wir die größte erreichte Höhe:

$$y_h = \frac{c^2 \sin^2 \alpha}{2g} \quad \ldots \ldots \, 61)$$

Wenn y = 0 wird, kehrt P wieder in die Höhe der Ausgangslage zurück, das geschieht aber zur Zeit:

$$t = \frac{2c \sin \alpha}{g} \quad \ldots \ldots \, 62)$$

der doppelten Steigzeit. Die Horizontalentfernung, die P bei diesem Zurückkehren vom Ausgangspunkt hat, nennt man Wurfweite, sie wird durch Einsetzen von Gleichung 62 in 58 erhalten und beträgt:

$$x_w = \frac{2c^2 \sin \alpha \cos \alpha}{g} = \frac{c^2}{g} \sin 2\alpha \; \ldots 63)$$

Sie erreicht ihren größten Wert, wenn $\sin 2\alpha = 1$ ist, also $\alpha = 45^0$, das ist also der günstigste Elevationswinkel für weiten Wurf; wenn wir überall $\alpha = 90^0$ setzen, erhalten wir die entsprechenden Formeln für vertikalen Wurf, wenn wir $\alpha = 0$ setzen, die für den horizontalen.

11. Bewegung des starren Körpers. Die wichtigsten Arten der Bewegung eines starren Körpers sind:

1. Die Translationsbewegung, von der wir schon im Anfang des vorigen Abschnittes gesprochen haben.

2. Die Rotationsbewegung (Drehbewegung), bei der eine substantielle Gerade des Körpers, die Rotationsachse, Punkt für Punkt ihre Lage beibehält und daher alle anderen substantiellen Punkte des Körpers Kreise um diese Gerade beschreiben.

3. Die Schraubenbewegung, die aus einer geradlinigen gleichförmigen Translation und einer gleichförmigen Rotation zusammengesetzt ist, die um eine zur Richtung der Translation parallele Achse erfolgt; dabei beschreiben die nicht auf der Achse gelegenen Punkte des Körpers Schraubenlinien.

Wenn wir nur Anfangs- und Endlage einer Bewegung, also nur die Verschiebung des Körpers, ins Auge fassen, so kann jede beliebige Verschiebung auch als Resultat einer Schraubenbewegung erhalten werden.

12. Bewegungsfreiheit. Freiheitsgrade. Man könnte jeden Körper in jede beliebige Lage bringen, wenn man über die Mittel verfügte, alle Hindernisse zu überwinden, alle Fesseln zu zerbrechen. Für die Theorie wird es sich aber als vorteilhaft erweisen, gewisse Hindernisse im vorhinein als unüberwindlich anzusehen. Solchen Hindernissen sind wir schon beim Begriff der starren Verbindung und des starren Körpers (Abschnitt 2) begegnet, wo die einzelnen substantiellen Punkte eines Körpers ihre Entfernung voneinander nicht ändern konnten. Aehnliches liegt bei Körpern vor, durch die etwa eine festgehaltene Achse gesteckt ist, so daß sie nichts tun können, als sich um diese Achse drehen. Man sagt: Ein Körper oder ein System von Körpern kann Bewegungsbedingungen unterworfen sein. Je weniger Bedingungen die Bewegung unterworfen ist, desto größer ist seine Bewegungsfreiheit. Die Bewegungsfreiheit wird gemessen durch die Anzahl der Zahlenangaben, die man machen muß, um eine Lage des Körpers oder Körpersystems unter allen mit den Bedingungen verträglichen Lagen festzulegen. Diese Anzahl nennt man die Zahl der Freiheitsgrade des Systems. So kann man die Lage eines einzelnen substantiellen Punktes durch drei Zahlen eindeutig festlegen (die Koordinaten). Man sagt: Ein frei beweglicher Punkt hat drei Freiheitsgrade. n Punkte haben 3n Freiheitsgrade. Wenn etwa ein substantieller Punkt P sich nur längs einer Fläche bewegen kann, so hat er nur zwei, längs einer Linie nur einen Freiheitsgrad. Ein starrer Körper hat sechs Freiheitsgrade. Denn um seine Lage festzulegen, muß die Lage von dreien seiner substantiellen Punkte festgelegt sein. (Wären nur zwei festgelegt, könnte er sich noch um die sie verbindende Gerade als Achse drehen.) Dazu gehören neun Koordinaten. Da aber die drei Entfernungen der Punkte voneinander bekannt sind, lassen sich diese neun Koordinaten durch sechs Größen ausdrücken.

Ein System, das einen einzigen Freiheitsgrad besitzt, nennt man zwangläufig. Beispiele sind etwa: ein um eine ruhende Achse rotierender Körper, eine Kugel, die sich in einer engen Rinne bewegt, das Kurbelgetriebe einer Dampfmaschine.

Die Bedingungen, die der Bewegung substantieller Punkte auferlegt sind, lassen sich häufig durch Bedingungsgleichungen zwischen den Koordinaten dieser Punkte ausdrücken.

Wenn etwa die Entfernung zweier Punkte P_1 (x_1, y_1, z_1) und P_2 (x_2, y_2, z_2) den unveränderlichen Wert r behalten soll, weil sie durch eine starre Stange verbunden sind, so bedeutet das, daß die Gleichung:

$$(x_2-x_1)^2 + (y_2-y_1)^2 + (z_2-z_1)^2 = r^2$$

bestehen muß, wie sich P_1 und P_2 auch bewegen. Jede Bedingungsgleichung erniedrigt die Anzahl der Freiheitsgrade um 1. Es haben n freie bewegliche Punkte 3n Freiheitsgrade; wenn aber s Bedingungsgleichungen bestehen, nur mehr 3n—s Grade.

Manche Bewegungsbedingungen lassen sich auch nur durch Ungleichungen ausdrücken; wenn etwa zwei Punkte durch einen biegsamen Faden von der Länge l verbunden sind, so kann ihre Entfernung niemals größer als l werden; dies wird ausgedrückt durch die Ungleichung:

$$(x_2-x_1)^2 + (y_2-y_1)^2 + (z_2-z_1)^2 < l^2.$$

13. Periodische und stationäre Be-

wegung. Wenn jeder substantielle Punkt eines Körpersystems immer nach Verlauf einer Zeit T seine ursprüngliche Lage und Geschwindigkeit wieder annimmt, so nennt man die Bewegung eine periodische und die Zeit T die Periode der Bewegung. Periodisch ist etwa die Bewegung der Erde um die Sonne, dabei ist die Periode ein Sonnenjahr.

Wenn alle substantiellen Punkte eines mechanischen Systems im Verlaufe ihrer Bewegung, wie lange sie auch dauert, immer innerhalb eines endlichen angebbaren Hohlraumes bleiben, so nennt man die Bewegung eine stationäre.

Der Ausdruck stationär wird auch noch in anderem Sinn gebraucht, wie in der Dynamik (Abschnitt 26) besprochen wird.

So ist z. B. die Bewegung der hypothetischen Gasmoleküle in einem Gefäß eine stationäre. Die Astronomen beschäftigen sich seit langem mit der Frage, ob die Bewegung des Planetensystems eine stationäre ist, d. h. ob man versichert sein kann, daß bei Fortdauer der heutigen Naturgesetze die Planeten immer innerhalb eines endlichen die Sonne umgebenden Raumes bleiben werden.

III. Dynamik. 14. Aufgabe der Dynamik. Die Erfahrung lehrt uns, daß die in der Natur vorkommenden Bewegungen sich nicht relativ zu jedem Bezugskörper mit gleicher Einfachheit beschreiben lassen. Es hat sich aber gezeigt, daß bei Wahl geeigneter Bezugskörper sich alle Bewegungserscheinungen nach einem einfachen Schema darstellen lassen. Da dieses Schema im wesentlichen auf der Verwendung des Begriffes der Kraft (Dynamis) beruht, so nennt man den Wissenszweig, der dieses Schema konstruiert, Folgerungen aus ihm zieht und die natürlichen Bewegungen ihm einordnet, Dynamik. Die Dynamik handelt also nicht nur von Relativbewegungen, sie zeichnet gewisse Bezugskörper aus und unterscheidet absolute Bewegung, d. i. Bewegung relativ zum ausgezeichneten Bezugskörper, von Relativbewegung, womit Bewegungen relativ zu willkürlichen Bezugskörpern gemeint sind.

15. Trägheit und Trägheitsgesetz. Man findet, daß die Bewegung eines Körpers von zwei Dingen abhängt: erstens von der Anfangsgeschwindigkeit, die ihm erteilt wird, zweitens von den äußeren Umständen, unter denen die Bewegung beginnt und vor sich geht. Je größer die Anfangsgeschwindigkeit ist, desto weniger wird er in der gleichen Zeit und unter gleichen Umständen aus seiner Richtung abgelenkt. Wenn die äußeren Einflüsse durch bewußtes Eingreifen menschlicher Muskelkraft ausgeübt werden, so merken wir, daß die Aenderung der Richtung und Größe der anfänglichen Geschwindigkeit um so geringer ist, je weniger wir unsere Muskelkraft anstrengen. Man sieht so jede Bewegung als ein Ringen zwischen der Anfangsgeschwindigkeit, die sich zu erhalten strebt, und den äußeren Einflüssen, die deren Richtung und Größe abzuändern suchen, an, oder wenn man kurz sagt: als ein Ringen zwischen Trägheit und äußeren Kräften. So behält z. B. eine Kanonenkugel ihre horizontale Bahn um so länger annähernd bei, mit je größerer Anfangsgeschwindigkeit sie abgeschossen ist und auf je weniger Hindernisse sie stößt.

Man idealisiert nun diese Erfahrungen und nimmt an, daß ein Körper, der gar keinen äußeren Einflüssen, sondern nur seiner Anfangsgeschwindigkeit unterworfen ist, diese nach Größe und Richtung in alle Ewigkeit beibehalten würde. Dieses Gesetz heißt Trägheitsgesetz, weil man das Streben der Körper, in gleichförmiger geradliniger Bewegung zu beharren, als Trägheit bezeichnet. Man spricht auch vom Beharrungsgesetz.

Das Gesetz enthält in der Form, wie wir es aussprachen, noch zwei Unbestimmtheiten. Erstens hat das Wort „gleichförmige geradlinige Bewegung“ nur relativ zu einem bestimmten Bezugskörper einen Sinn, und erst wenn ich im Trägheitsgesetz einen solchen nenne, bekommt es eine bestimmte physikalische Bedeutung. Es hat sich nun gezeigt, daß man den Fixsternhimmel, der ja nahezu (wegen der geringen Eigenbewegungen der Sterne) einen starren Körper bildet, dem Trägheitsgesetz als Bezugskörper zugrunde legen muß. Relativ zu ihm beschreiben die Körper, auf die keine äußeren Einflüsse wirken, geradlinige Bahnen. Einen Körper, relativ zu dem das Trägheitsgesetz gilt, nennt man Fundamentalkörper, ein mit ihm verbundenes Koordinatensystem Fundamentalsystem oder Inertialsystem (inertia = Trägheit). Wenn K ein Fundamentalkörper ist, so ist jeder Körper K', der relativ zu K eine gleichförmige geradlinige Translationsbewegung ausführt, auch ein Fundamentalkörper. Die zweite Unbestimmtheit liegt darin, daß wir nicht klar definieren können, was es heißt, „ein Körper ist keinen äußeren Einflüssen ausgesetzt“. Aus den Ausführungen des nächsten Abschnittes wird erst hierauf ein Licht fallen.

16. Kraft. Masse. Newtons Bewegungsgesetze. Wir verfolgen die Bewegung substantieller Punkte. Die Erfahrung lehrt uns, daß sich bei den in der Natur vorkommenden Bewegungen für den Beschleunigungsvektor jedes substantiellen Punktes einfache Gesetzmäßig

keiten aufstellen lassen. Es läßt sich dieser Vektor meist in verhältnismäßig einfacher Weise als abhängig von der Lage des Punktes, seiner Geschwindigkeit, sowie den Eigenschaften der ihn umgebenden Körper auffassen, oder wie der Mathematiker sagt, als Funktion dieser Größen darstellen. Der Beschleunigungsvektor ist aber das Maß der Abweichung der Bewegung von der geradlinig gleichförmigen. Wir betrachten also die äußeren Einflüsse als die Ursachen dieser Abweichung. Wenn ich etwa einen Körper als Pendel schwingen lasse, nimmt er eine bestimmte Beschleunigung an, ebenso wenn ich ihn an eine Spiralfeder anhänge und unter dem Einfluß von deren Elastizität seine Schwingungen ausführen lasse.

Zwei verschiedene Körper, wenn auch von derselben Größe (im Grenzfalle also selbst zwei substantielle Punkte) nehmen unter denselben äußeren Umständen im allgemeinen nicht die gleiche Beschleunigung an. So gerät, an eine Spiralfeder angehängt, ein Eisenstück in viel weniger beschleunigte Schwingungen, als ein gleich großes Holzstück. (Eine Ausnahme bildet scheinbar die Beschleunigung beim freien Fall, beim gewöhnlichen Pendel u. ä.) Wir sagen von einem Körper, der eine kleine Beschleunigung erhält, sich also der Aenderung seiner Geschwindigkeit mehr widersetzt, er habe eine größere Trägheit. Die Trägheit eines Körpers wird gemessen durch seine M a s s e. Wenn ein Körper K_1 und ein Körper K_2 unter denselben Umständen die Beschleunigungen $\mathfrak{w}_1$ bezw. $\mathfrak{w}_2$ annehmen, so sagen wir, ihre Massen verhalten sich verkehrt wie diese Beschleunigungen. Da uns die Erfahrung lehrt, daß dieses Beschleunigungsverhältnis zweier Körper, wenn sie unter beliebige Umstände gebracht werden, nur beide unter dieselben, immer konstant bleibt, so ist dadurch das Verhältnis der Massen zweier beliebiger Körper definiert. Es muß nur noch ein willkürlicher Körper als Masseneinheit angenommen werden, um auch die Masse jedes Körpers selbst, als Verhältnis seiner Masse zu der des Einheitskörpers festzulegen. Als Einheitskörper wählt man 1 ccm Wasser bei + 4° C und 760 mm Barometerstand. Man nennt diese Masse die Masse eines Grammes. Die Masse eines Körpers ist an allen Orten der Erde dieselbe.

Sie ist überhaupt unveränderlich, solange feststeht, daß das Beschleunigungsverhältnis $\frac{\mathfrak{w}_1}{\mathfrak{w}_2}$ nicht von den äußeren Umständen, zu denen auch die augenblickliche Geschwindigkeit des Teilchens gehört, abhängt. Neuere Untersuchungen über die hypothetischen Teilchen, die in den Kathodenstrahlen fliegen, scheinen nun zu zeigen, daß $\frac{\mathfrak{w}_1}{\mathfrak{w}_2}$ auch von der Geschwindigkeit des Teilchens abhängt; dann ist auch die Masse mit der Geschwindigkeit veränderlich.

Ein Körper K_1 habe die Masse m_1, ein Körper K_2 die Masse m_2; die Beschleunigungen, die beide unter gleichen Umständen annehmen, $\mathfrak{w}_1$ und $\mathfrak{w}_2$, sind gleich gerichtet und es gilt:

$$\mathfrak{w}_1 : \mathfrak{w}_2 = m_2 : m_1$$

Daraus folgt:

$$m_1 \mathfrak{w}_1 = m_2 \mathfrak{w}_2$$

d. h. das Produkt aus Masse und Beschleunigung hat für alle Körper an einer bestimmten Stelle des Raumes unter bestimmten äußeren Umständen einen und denselben bestimmten Wert. Diesen Wert, der natürlich ein Vektor von der Richtung dieser Beschleunigung ist, nennt man die an diesem Raumpunkt infolge der äußeren Umstände herrschende K r a f t, wir wollen ihn mit $\mathfrak{K}$ bezeichnen. Es gilt dann für jede Masse m und ihre Beschleunigung $\mathfrak{w}$ die Gleichung:

$$m \mathfrak{w} = \mathfrak{K}, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 64)$$

wo $\mathfrak{K}$ durch die Lage des Körpers zu anderen Körpern und die Eigenschaften dieser bestimmt ist. Das Gesetz gilt natürlich in Schärfe nur für einen substantiellen Punkt, den wir, insofern wir ihn mit Masse begabt denken, M a s s e n p u n k t oder m a t e r i e l l e n P u n k t nennen; denn ein ausgedehnter Körper nimmt nicht nur einen einzigen Raumpunkt ein. Dieses Gesetz nennt man das N e w t o n s c h e K r a f t g e s e t z. Aus ihm folgt unmittelbar: Wenn irgendwo $\mathfrak{K} = 0$ ist, so ist auch $\mathfrak{w} = 0$; ein dorthin gebrachter Körper erleidet keine Beschleunigung, er bewegt sich geradlinig und gleichförmig. Das Trägheitsgesetz ist also ein spezieller Fall des Kraftgesetzes. Wir können jetzt die im vorigen Abschnitt erwähnte Unbestimmtheit im Trägheitsgesetz vermeiden, indem wir sagen: Wenn ein Körper eine Beschleunigung hat, so läßt sich diese durch eine einfache Gesetzmäßigkeit mit den äußeren Verhältnissen (und dazu gehören insbesondere die Größen und Entfernungen der ihn umgebenden Massen) in Zusammenhang bringen; hat er keine Beschleunigung, so sagen wir: er ist äußeren Einwirkungen nicht ausgesetzt; dadurch wird das Trägheitsgesetz in gewissem Sinne zu einer Tautologie. Es bleibt nur der reale Inhalt bestehen, daß durch die äußeren Einflüsse die Beschleunigungen gegeben sind, während die Anfangsgeschwindigkeit beliebig erteilt werden kann, d. h. ein Körper unter denselben äußeren augenblicklichen Umständen beliebige Geschwindigkeiten besitzen kann.

Wir können nun auch sowohl Kraftvektor als Beschleunigungsvektor in die Komponenten nach den drei Achsen zer-

legen, dann lautet das Newtonsche Kraftgesetz:

$$m \mathfrak{w}_x = \mathfrak{K}_x, \; m \mathfrak{w}_y = \mathfrak{K}_y, \; m \mathfrak{w}_z = \mathfrak{K}_z \quad 65)$$

Wenn die Kraftkomponenten als Funktionen der Lage des Punktes zu den äußeren Körpern oder anderswie gegeben sind, nennt man diese Gleichungen die Newtonschen Bewegungsgleichungen.

In der Schreibweise der Differentialrechnung schreibt man sie:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = \mathfrak{K}_x, \; m \frac{d^2y}{dt^2} = \mathfrak{K}_y, \; m \frac{d^2z}{dt^2} = \mathfrak{K}_z.$$

Wenn die Bewegung gegeben ist, läßt sich die Kraft immer berechnen, indem man die Beschleunigung berechnet. Als Beispiel betrachten wir erstens den freien Fall. Hier ist die Beschleunigung bekanntlich konstant und hat für alle Körper denselben Wert g, die Kraft also den Wert mg; es ist also die Kraft, die von der Schwere auf jeden Körper ausgeübt wird, proportional seiner Masse; daher kommt die scheinbare Ausnahme, daß die Schwerkraft allen Körpern, ohne Rücksicht auf ihre Masse, dieselbe Beschleunigung erteilt, oder eigentlich exakt gesprochen: diese Erfahrungstatsache drücken wir eigentlich aus, wenn wir sagen: die Schwerkraft wächst mit der Masse.

Wir wollen ferner die von der Sonne auf einen Planeten ausgeübte Kraft berechnen. Der Planet bewege sich, so nehmen wir näherungsweise an, in einem Kreise vom Radius r gleichförmig um die Sonne, die Umlaufszeit sei T, dann ist seine Geschwindigkeit:

$$v = \frac{2\pi r}{T}$$

seine Beschleunigung ist gegen die Sonne gerichtet und ist im Abschn. 8, Gl. 49 gegeben; die Kraft hat also den Wert:

$$K = \frac{mv^2}{r} = \frac{4m\pi^2 r}{T^2}$$

Nach dem dritten Keplerschen Gesetze sind nun die Quadrate der Umlaufszeiten der Planeten proportional den dritten Potenzen ihrer Abstände von der Sonne; es hat also $\frac{T^2}{r^3}$ einen für alle Planeten konstanten Wert; wir setzen etwa:

$$\frac{T^2}{r^3} = C$$

Wenn wir das in die vorige Formel einsetzen, erhalten wir:

$$K = \frac{4m\pi^2}{C} \frac{1}{r^2}.$$

d. h. die Kraft ist verkehrt proportional dem Quadrate des Abstandes; wir erhalten so das Newtonsche Gravitationsgesetz.

Schließlich sei noch erwähnt, daß auch das Kraftgesetz zur völligen Bestimmtheit einen bestimmten Bezugskörper braucht. Es ist hier dasselbe Inertialsystem wie beim Trägheitsgesetz zu wählen.

Neben dem genannten Problem, zu einer gegebenen Bewegung die Kraft zu finden, ist auch noch das umgekehrte Problem zu lösen. Wenn die Kraft und damit die Beschleunigung gegeben ist, soll die Bewegung bestimmt werden. Dieses Problem ist oft recht schwierig zu behandeln; wir haben beim freien Fall (s. oben II 8) ein einfaches Beispiel dafür gegeben.

Es erfordert im einfachsten Fall die Integration einer Differentialgleichung zweiter Ordnung; dabei müssen Anfangslage und Anfangsgeschwindigkeit gegeben sein, um die beiden Integrationskonstanten zu bestimmen.

17. Satz vom Kräfteparallelogramm. Von einer Kraft $\mathfrak{K}$, die irgendwo herrscht, sagt man, daß sie von einem bestimmten Körper ausgeübt wird, wenn sie bei Entfernung dieses Körpers verschwindet. Es mögen auf einen materiellen Punkt mit der Masse m vom Körper K_1, die Kraft $\mathfrak{K}_1$, vom Körper K_2 die Kraft $\mathfrak{K}_2$ ausgeübt werden; d. h. der Punkt erführe, wenn jeder der Körper einzeln vorhanden wäre, die Beschleunigungen

$$\mathfrak{w}_1 = \frac{\mathfrak{K}_1}{m} \quad \text{oder} \quad \mathfrak{w}_2 = \frac{\mathfrak{K}_2}{m}$$

Die Erfahrung zeigt nun, daß die Beschleunigung des Punktes bei Anwesenheit beider Körper die Summe der Einzelbeschleunigungen ist, natürlich die Vektorsumme;

also: $\mathfrak{w} = \mathfrak{w}_1 + \mathfrak{w}_2 = \frac{\mathfrak{K}_1}{m} + \frac{\mathfrak{K}_2}{m}$

Daraus folgt:

$$m\mathfrak{w} = \mathfrak{K}_1 + \mathfrak{K}_2$$

d. h. der Punkt erhält eine Beschleunigung, als würde eine Kraft $\mathfrak{K}$ auf ihn wirken, welche der Vektorsumme der beiden Einzelkräfte gleich ist; diese Kraft:

$$\mathfrak{K} = \mathfrak{K}_1 + \mathfrak{K}_2$$

nennt man die Resultierende von $\mathfrak{K}_1$ und $\mathfrak{K}_2$, diese wieder die Komponenten von $\mathfrak{K}$. Dieser Satz heißt: „Satz von Kräfteparallelogramm", weil nach der Definition der Vektoraddition $\mathfrak{K}$ die Diagonale eines Parallelogramms ist, dessen Seiten $\mathfrak{K}_1$ und $\mathfrak{K}_2$ sind.

In den Komponenten geschrieben lautet die Gleichung:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = \mathfrak{K}_x^{(1)} + \mathfrak{K}_x^{(2)}, \; m \frac{d^2y}{dt^2} = \mathfrak{K}_y^{(1)} + \mathfrak{K}_y^{(2)},$$

$$m \frac{d^2z}{dt^2} = \mathfrak{K}_z^{(1)} + \mathfrak{K}_z^{(2)}.$$

Als Beispiel kann etwa die Bewegung des Mondes unter dem Einfluß von Erde und Sonne dienen. Die von beiden ausgeübten Anziehungskräfte addieren sich. Die Bewegung dreier einander nach dem Gravitationsgesetz anziehenden Körper zu berechnen ist Gegenstand des sogenannten Dreikörperproblems. Seine Lösung ist eine rein mathematische Aufgabe.

18. Bewegungsgröße. Impuls. Wenn wir die Beschleunigung wie im Abschnitt 8 (Gleichung 33) durch die Geschwindigkeit näherungsweise ausdrücken, so schreibt sich das Kraftgesetz:

$$\mathfrak{m}(\mathfrak{v}_1 - \mathfrak{v}_0) \sim \mathfrak{K}(t_1 - t_0) \quad . \; . \; . \; 67)$$

Diese Gleichung gilt um so genauer, je kleiner der Zeitraum $t_1 - t_0$ ist. Man nennt das Produkt aus einer Kraft in die Zeit, während deren sie wirkt, den Antrieb dieser Kraft während dieser Zeit. Man nennt das Produkt aus der Masse eines materiellen Punktes in seiner Geschwindigkeit seine Bewegungsgröße (auch Bewegungsmoment) oder seinen Impuls zu dieser Zeit. Die Gleichung (67) besagt also, daß die Aenderung der Bewegungsgröße eines Punktes in einem kleinen Zeitraum gleich dem Antrieb der auf ihn wirkenden Kraft während dieses Zeitraumes ist.

In der Sprache der Differentialrechnung ist:

$$\frac{d}{dt}(m\mathfrak{v}) = \mathfrak{K} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; 68)$$

oder: $$d(m\,\mathfrak{v}) = \mathfrak{K}dt$$

Antrieb und Impuls sind ebenso Vektoren wie Kraft und Geschwindigkeit. Die Gleichung (67) gilt für so große Zeitintervalle t_1—t_0, wie man $\mathfrak{K}$ nahezu als konstant ansehen kann. Will man die Aenderung des Impulses für eine größere Zeit berechnen, so schaltet man Zeitpunkte ein. Sei etwa die Zeitstrecke t_0, t_n durch die Zeitpunkte $t_1, t_2, \ldots$ in kleine Strecken geteilt, dann ist:

$$m(\mathfrak{v}_n - \mathfrak{v}_0) \sim \mathfrak{K}_0(t_1 - t_0) + \mathfrak{K}_1(t_2 - t_1) + \mathfrak{K}_2(t_3 - t_2) + \ldots \mathfrak{K}_{n-1}(t_n - t_{n-1}), \quad 69)$$

wo $\mathfrak{K}_0$, $\mathfrak{K}_1$ usw. die Werte der Kraft im betreffenden Zeitintervall bedeuten.

In der Sprache der Integralrechnung erhält man einfach durch Integration:

$$m(\mathfrak{v}_n - \mathfrak{v}_0) = \int_{t_0}^{t_n} \mathfrak{K}dt \quad . \; . \; . \; . \; . \; 70)$$

Setzen wir für den Impuls einen eigenen Buchstaben:

$$\mathfrak{J} = m\mathfrak{v},$$

so können wir das Kraftgesetz schreiben:

$$\mathfrak{J}_1 - \mathfrak{J}_0 \sim \mathfrak{K}(t_1 - t_0),$$

oder:

$$\frac{d\mathfrak{J}}{dt} = \mathfrak{K}.$$

In Worten: Die Kraft ist der Aenderung des Impulses in der Zeiteinheit gleich. Unter dem Impuls mehrerer Punkte versteht man die Vektorsumme der Einzelimpulse:

$$\mathfrak{J} = \mathfrak{J}_1 + \mathfrak{J}_2 + \ldots + \mathfrak{J}_n = m_1\mathfrak{v}_1 + m_2\mathfrak{v}_2 + \ldots \; 73)$$

Haben wir es mit einem stetig zusammenhängenden Körper von variabler Dichte zu tun, so erhalten wir den Gesamtimpuls, indem wir die Masse jedes Volumelementes betrachten, sie mit der Geschwindigkeit des Elementes multiplizieren und die so für jeden Teil des Körpers erhaltenen Einzelimpulse alle addieren. Wirken auf jedes Element des Körpers Kräfte, so gilt für jedes das Kraftgesetz und durch Addition finden wir:

$$\mathfrak{J}_1 - \mathfrak{J}_0 \sim \mathfrak{K}(t_1 - t_0)$$

wo jetzt $\mathfrak{J}$ der Gesamtimpuls ist und $\mathfrak{K}$, die Resultierende aller Kräfte, nach dem Parallelogrammgesetz aus den Einzelkräften gebildet wird. Wenn z. B. ein homogener, symmetrischer starrer Körper um seine Symmetrieachse rotiert, so ist sein Impuls dabei Null; denn jeder Geschwindigkeit eines Elementes entspricht eine gleich große und entgegengesetzte gerichtete eines anderen Elementes von gleicher Masse, deren Vektorsumme sich aufhebt. Da der Impuls während der ganzen Bewegung Null ist, muß auch die Vektorsumme aller auf ihn wirkenden Kräfte Null sein, wenn sie ihn auch beschleunigen. Die Kräfte können also etwa in je zwei einander gleich und entgegengesetzt gerichteten bestehen, die ihn in Drehung versetzen. Ist der Körper um die Achse unsymmetrisch, so ist der Impuls schon von Null verschieden.

19. Das Gesetz der Gleichheit von Wirkung und Gegenwirkung. Wir nehmen an, auf den materiellen Punkt P_1 wirke eine Kraft, die vom Punkte P_2 ausgeübt wird; sie heiße $\mathfrak{K}_1$, gleichzeitig übe auch P_1 auf P_2 eine Kraft aus, die Q_2 heiße. Die Erfahrung zeigt uns, daß überall, wo in der Natur ein derartiger Fall eintritt, die Kräfte $\mathfrak{K}_1$ und $\mathfrak{K}_2$ einander gleich, aber entgegengesetzt gerichtet sind:

$$\mathfrak{K}_2 = -\mathfrak{K}_1 \quad \text{oder} \quad \mathfrak{K}_1 + \mathfrak{K}_2 = 0.$$

Dieses Gesetz nennt man das Gesetz der Gleichheit von Wirkung und Gegenwirkung, oder von Aktion und Reaktion.

Dieses Gesetz ist das dritte der berühmten Newtonschen drei Bewegungsgesetze; das erste ist das Trägheitsgesetz, das zweite das Kraftgesetz. Die Punkte P_1 und P_2 können räumlich voneinander entfernt liegen, wie etwa Sonne und Erde in der Astronomie, die aufeinander gleiche, aber entgegengesetzt gerichtete Kräfte ausüben. Das Gesetz gilt aber nicht nur für Punkte, sondern für einander berührende Körper. Wenn etwa eine Last auf ihre Unterlage einen Druck ausübt, so übt die Unterlage einen gleichen, aber nach oben gerichteten Gegendruck aus.

Wir denken uns ein System von Körpern, die aufeinander Kräfte ausüben, die dem Gesetze der Gleichheit von Wirkung und Gegenwirkung gehorchen. Von außen soll keine Kraft auf das System wirken. Dann

gehört zu jeder Kraft im System eine gleiche, aber entgegengesetzt gerichtete. Die Vektorsumme aller Kräfte ist also Null. Nach dem vorigen Abschnitt ist daher auch die Aenderung des gesamten Impulses des Systems Null, d. h. dieser Gesamtimpuls bleibt konstant, man spricht von dem Gesetze der Erhaltung des Impulses oder der Bewegungsgröße, das in jedem System gilt, in dem nur sogenannte innere Kräfte wirken, die dem dritten Newtonschen Gesetze gehorchen. Ein solches System ist etwa das Planetensystem. Man kann das Gesetz schreiben

$$m_1\mathfrak{v}_1 + m_2\mathfrak{v}_2 + m_3\mathfrak{v}_3 + \ldots = \text{konstant}.$$

20. Schwerpunkt. Bewegung des Schwerpunktes. Wir betrachten zwei Punkte von den Massen m_1 und m_2. Dann ist ihr Gesamtimpuls:

$$\mathfrak{J} = m_1\mathfrak{v}_1 + m_2\mathfrak{v}_2$$

Wenn wir uns auf der Verbindungslinie der beiden Massen einen Massenpunkt M denken, der die Masse $m_1 + m_2$ hat und dessen Entfernung von m_1 und m_2 diesen Massen fortwährend verkehrt proportional ist (der also der größeren Masse näher liegt), so wird dieser Massenpunkt, wenn m_1 und m_2 sich bewegen, ebenfalls in bestimmter Weise sich bewegen und sein Impuls wird dabei dem Gesamtimpuls von m_1 und m_2 gleich sein.

Denn: M habe von m_1 die Entfernung e_1, von m_2 die Entfernung e_2, dann ist laut Voraussetzung:

$$m_1e_1 = m_2e_2$$

und:
$$e_1 + e_2 = e,$$

wenn e die Entfernung zwischen m_1 und m_2 ist; daraus folgt:

$$e_1 = \frac{m_2}{m_1 + m_2}\,e, \quad e_2 = \frac{m_1}{m_1 + m_2}\,e$$

Daraus sieht man weiter: wenn $\mathfrak{r}_1$ und $\mathfrak{r}_2$ die Lagevektoren von m_1 und m_2 sind, so ist der Lagevektor $\mathfrak{r}$ von M gegeben durch:

$$\mathfrak{r} = \frac{m_1\mathfrak{r}_1 + m_2\mathfrak{r}_2}{m_1 + m_2},$$

oder: $(m_1 + m_2)\mathfrak{r} = m_1\mathfrak{r}_1 + m_2\mathfrak{r}_2$.

Nun ist die Aenderung der linken Seite während eines kleinen Zeitintervalls laut Definition der Geschwindigkeit gleich dem Impuls von M, die der rechten Seite gleich dem Impuls von m_1 und m_2.

Den Punkt M nennt man den Massenmittelpunkt der Massen m_1 und m_2, oder auch von einer speziellen Anwendung her den Schwerpunkt. Der Schwerpunkt ist für jede augenblickliche Konstellation der Massen definiert und ändert seine Lage mit dieser. Man kann die Definition auf auch auf n Massenpunkte erweitern: Es mögen $\mathfrak{r}_1$, $\mathfrak{r}_2 \ldots \mathfrak{r}_n$ die Lagevektoren der Massen $m_1, m_2, \ldots, m_n$ sein; dann heißt der Punkt M mit dem Lagevektor:

$$\mathfrak{r} = \frac{m_1\mathfrak{r}_1 + m_2\mathfrak{r}_2 + \ldots + m_n\mathfrak{r}_n}{m_1 + m_2 + \ldots + m_n} \quad 74)$$

der Schwerpunkt. Denkt man sich nun die Gesamtmasse $m_1 + m_2 + \ldots m_n$ in M vereinigt, so ist der Impuls dieser Masse M gleich dem Gesamtimpuls aller Massen: m_1, $m_2, \ldots, m_n$.

Drücken wir die Lage der Massen durch ihre Koordinaten x_1, y_1, z_1 usw. aus, so hat der Schwerpunkt die Koordinaten:

$$\left.\begin{aligned} x &= \frac{m_1x_1 + \ldots + m_nx_n}{m_1 + m_2 + \ldots + m_n} \\ y &= \frac{m_1y_2 + \ldots + m_ny_n}{m_1 + \ldots + m_n} \\ z &= \frac{m_1z_2 + \ldots + m_nz_n}{m_1 + m_2 + \ldots + m_n} \end{aligned}\right\} \quad \ldots 75)$$

Sind die Massen kontinuierlich über einen Körper verteilt und enthalte das Volumelement dv die Masse ϱdv (ϱ ist dann die Dichte), so sind die Koordinaten (ξ, η, ζ) des Schwerpunktes gegeben durch:

$$\left.\begin{aligned} \xi &= \frac{\int \varrho\, x\, dv}{\int \varrho\, dv} \\ \eta &= \frac{\int \varrho\, y\, dv}{\int \varrho\, dv} \\ \zeta &= \frac{\int \varrho\, z\, dv}{\int \varrho\, dv} \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots 76)$$

Wenn nur innere Kräfte wirken, bleibt der Impuls der im Schwerpunkt vereinigt gedachten Massen durch alle Zeiten konstant, da er ja gleich dem Gesamtimpuls des Systems ist, dessen Erhaltung wir bewiesen haben. Es muß daher der Schwerpunkt eines Systems von Massen, die nur aufeinander wirken, eine konstante Geschwindigkeit beibehalten; d. h., wenn er einmal ruhte, bleibt seine Ruhe, wenn er sich einmal bewegte, Richtung und Betrag der Geschwindigkeit erhalten. Kurz: für den Schwerpunkt eines Massensystems gilt das Trägheitsgesetz. Man nennt diesen Satz den Schwerpunktssatz; er ist die unmittelbare Folge des Satzes der Gleichheit von Aktion und Reaktion.

Ein wichtiges Beispiel bildet unser Sonnensystem. Sein Schwerpunkt, der nahezu mit der Sonne zusammenfällt, kann nur ruhen oder sich gleichförmig geradlinig bewegen; als Bezugssystem ist dabei der Fixsternhimmel zu nehmen. Wollen wir den Schwerpunktssatz auf die gesamte Sternenwelt anwenden, so kommen wir, selbst wenn wir die Anzahl der Sterne als endlich annehmen, in Schwierigkeiten. Denn indem wir die Bewegung der Fixsterne berechnen, verlieren wir unser Bezugssystem und wir wissen nicht mehr, wo eigentlich das Fundamentalsystem zu suchen ist.

Die Analogie zwischen einem freien Punkt und dem Schwerpunkt eines Massensystems geht aber noch weiter. Außer dem Trägheitsgesetz läßt sich auch das Kraftgesetz übertragen.

Wir sahen im Abschnitt 18, daß die Aenderung des Gesamtimpulses eines Massensystems gleich dem Antrieb der Vektorsumme aller darauf wirkenden Kräfte ist. Wegen des Gegenwirkungsprinzips wird die Vektorsumme der inneren Kräfte Null und die Aenderung des gesamten Impulses ist gleich der Vektorsumme der äußeren Kräfte. Die Aenderung des gesamten Impulses ist aber wieder gleich der Aenderung des Impulses des Schwerpunktes M, wenn wir uns dort alle Massen vereinigt denken. Der Schwerpunkt M verhält sich also wie ein einzelner Punkt von der Masse des ganzen Systems. Wenn $\mathfrak{w}$ die Beschleunigung des Schwerpunktes ist, können wir schreiben:

$$(m_1 + m_2 + \ldots m_n)\,\mathfrak{w} = \mathfrak{K}_a \quad . \; . \; 77)$$

wo $\mathfrak{K}_a$ die Vektorsumme der äußeren Kräfte ist. Die Bewegung des Schwerpunktes kann also nur durch äußere Kräfte beeinflußt werden.

21. Drehimpuls. Flächensatz. Das Produkt aus der Masse und der Flächengeschwindigkeit (Abschnitt 9) eines materiellen Punktes nennen wir seinen Drehimpuls für den Punkt O, in bezug auf den die Flächengeschwindigkeit bestimmt wurde; wir sagen kurz: für den Bezugspunkt O.

Wenn sich zur Geschwindigkeit $\mathfrak{v}$ eine andere addiert, deren Richtung in ihrer Verlängerung durch den Bezugspunkt geht, so wird dadurch die Flächengeschwindigkeit nicht verändert, da ja der Lagevektor bei einer radial gerichteten Bewegung keine Fläche beschreibt. Eine Kraft, deren Richtung gegen den Bezugspunkt zeigt, erteilt aber der Geschwindigkeit eine radial gerichtete Zusatzgeschwindigkeit, verändert also die Flächengeschwindigkeit nicht. Wenn also eine Kraft auf einen Punkt P wirkt, die immer gegen ein festes Zentrum O gerichtet ist, wird sie nach dem Kraftgesetz eine gegen O gerichtete Beschleunigung erteilen, also die Flächengeschwindigkeit von P für den Bezugspunkt O nicht ändern. Ein Körper, der von einem festen Zentrum angezogen wird, bewegt sich also mit konstanter Flächengeschwindigkeit, sein Lagevektor beschreibt in gleichen Zeiten gleiche Flächen. Dieser Satz ist ein Spezialfall des allgemeinen Flächensatzes, der von der Veränderung des Drehimpulses bei beliebigen Kräften handelt (vgl. den Artikel „Drehbewegung").

Die Planeten sind bei ihren Bewegungen um die Sonne Beispiele für die Erhaltung der Flächengeschwindigkeit (Zweites Keplersches Gesetz).

22. Trägheitskraft. Zentrifugalkraft. Wenn wir einem Körper eine Beschleunigung erteilen wollen, so wirkt er durch seine Trägheit dem entgegen, und zwar um so stärker, je größer seine Masse und je größer die Beschleunigung ist, die wir ihm erteilen wollen. Wir sagen: der Körper übt eine Trägheitskraft aus, und wir messen diese Trägheitskraft durch einen Vektor, dessen Betrag dem Produkt aus Masse und Beschleunigung gleich und dessen Richtung der Beschleunigung im entgegengesetzten Sinne parallel, ist. Die Trägheitskraft $\mathfrak{K}_{tr}$ ist also gegeben durch:

$$\mathfrak{K}_{tr} = - m\mathfrak{w} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; 78)$$

Mit Hilfe dieser Bezeichnung können wir das Newtonsche Kraftgesetz $m\mathfrak{w} = \mathfrak{K}$ auch schreiben:

$$\mathfrak{K} = -\mathfrak{K}_{tr}$$

d. h. wenn eine Kraft $\mathfrak{K}$ auf einen Massenpunkt wirkt, so erteilt sie ihm eine Bewegung, die ihrerseits eine Trägheitskraft weckt, die der äußeren Kraft $\mathfrak{K}$ gleich, aber entgegengesetzt gerichtet ist. Wäre die Trägheitskraft eine wirkliche Kraft, so würde sie mit der äußeren Kraft $\mathfrak{K}$ zusammen die Masse m im Gleichgewicht erhalten. Wir wollen darum allgemein von Kräften (seien sie wirkliche oder Trägheitskräfte) sagen, „sie halten einander das Gleichgewicht", wenn sie nach Ersetzung aller Trägheitskräfte durch gleiche wirkliche Kräfte das Körpersystem, an dem sie wirken, im Gleichgewicht erhalten würden.

Wir können dann das Kraftgesetz so aussprechen: Jeder Massenpunkt bewegt sich so, daß die durch die Bewegung erzeugte Trägheitskraft der äußeren Kraft das Gleichgewicht hält (wobei „Gleichgewicht" im erwähnten erweiterten Sinne zu verstehen also nicht mit „Ruhe" zu verwechseln ist).

Bewegt sich der Punkt P in einem Kreise vom Radius r mit der konstanten Geschwindigkeit v, so hat er (siehe II, Abschnitt 8, Gleichung 49) eine gegen den Kreismittelpunkt gerichtete Beschleunigung vom Betrage $\frac{v^2}{r}$; es wird also durch die Bewegung eine Trägheitskraft geweckt, die vom Kreismittelpunkt weg gerichtet ist und den Betrag:

$$\mathfrak{K}_{tr} = \frac{mv^2}{r}$$

hat. Diese Trägheitskraft nennt man Zentrifugalkraft (centrum fugere = vom Mittelpunkt fliehen) oder Fliehkraft. Die äußere Kraft bei der Kreisbewegung muß der Zentrifugalkraft gleich, aber entgegengesetzt gerichtet sein; man nennt sie darum Zentripetalkraft (centrum petere = zum Mittelpunkt streben). Man findet in vielen Darstellungen Unklarheiten über die Fliehkraft; man kann sie vermeiden, wenn man sich immer vergegenwärtigt, daß sie keine wirkliche, sondern nur eine Trägheitskraft ist.

Man bezeichnet nun auch allgemein, nicht nur bei der Kreisbewegung, die gegen den Krümmungsmittelpunkt der Bahn gerichtete Komponente der Trägheitskraft als Zentrifugalkraft; sie hat also allgemein, wenn r der Krümmungsradius ist, den Betrag $\frac{mv^2}{r}$.

23. Das d'Alembertsche Prinzip. Wenn die materiellen Punkte nicht frei beweglich, sondern Bedingungen (s. Abschnitt 12) unterworfen sind, so müssen die in jedem Punkt angreifenden Kräfte nicht die Vektorsumme Null ergeben, um das System im Gleichgewicht zu erhalten. So bleibt z. B. ein auf einem horizontalen Tisch liegender schwerer Körper in Ruhe, obwohl die Schwerkraft ihn nach abwärts zieht. In der Lehre vom Gleichgewicht (Statik) werden die Eigenschaften auseinandergesetzt, welche die Kräfte im allgemeinen Fall besitzen müssen, um Gleichgewicht zu erzielen. Wir verallgemeinern daher den Begriff des Gleichgewichtes zwischen wirklichen Kräften und Trägheitskräften, indem wir sagen: wenn ein mechanisches System sich beliebig bewegt, so sagen wir, daß die dadurch erzeugten Trägheitskräfte den äußeren Kräften das Gleichgewicht halten, wenn sie dies unter Beibehaltung der Bewegungsbedingungen und bei Ersetzung aller Trägheitskräfte durch gleiche wirkliche im Sinne der Statik täten. d'Alembert hat nun das Newtonsche Kraftgesetz auf die Fälle, wo die Bewegung Bedingungen erfüllen muß, ausgedehnt und das Prinzip aufgestellt: ein mechanisches System bewegt sich so, daß die durch die Bewegung erzeugten Trägheitskräfte den die Bewegung erzeugenden äußeren Kräften im oben definierten Sinne das Gleichgewicht halten. Aus diesem Prinzip läßt sich die Bewegung des Systems bestimmen, sobald man die Gleichgewichtsbedingungen kennt. Wir geben im nächsten Abschnitt Beispiele dafür.

24. Bewegung auf der schiefen Ebene. Atwoodsche Fallmaschine. Ein materieller Punkt von der Masse m liege auf einer schiefen Ebene vom Neigungswinkel α. Auf ihn wirke in der Richtung der schiefen Ebene nach aufwärts die Kraft K. Diese Kraft K hält der auf den Punkt vertikal nach abwärts wirkenden Schwerkraft mg (wo g die Beschleunigung der Schwere ist, s. Abschnitt 16) dann das Gleichgewicht, wenn:

$$K = mg \sin \alpha$$

ist (vgl. den Artikel „Gleichgewicht"). Wenn keine äußere Kraft außer der Schwerkraft wirkt, gleitet der Punkt mit einer Beschleunigung w nach abwärts. Nach dem d'Alembertschen Prinzip ist diese Beschleunigung so groß, daß die ihr entsprechende Trägheitskraft, wenn sie durch eine gleich große wirkliche Kraft ersetzt würde, den Punkt im Gleichgewicht erhielte. Die Trägheitskraft hat den Betrag mw und wirkt, weil der Punkt nach unten gleitet, nach oben wie die früher genannte Kraft K, muß also denselben Betrag haben wie diese. Sie muß also die Gleichung:

$$mw = mg \sin \alpha$$

erfüllen oder:

$$w = g \sin \alpha \quad . \; . \; . \; . \; 80)$$

Dadurch ist die Beschleunigung auf der schiefen Ebene mit der beim freien Fall (g) in Beziehung gesetzt; sie ist um so kleiner, je flacher die Ebene ist.

Ein anderes Mittel zur Verkleinerung der Fallgeschwindigkeit ist die beim Schulunterricht oft gebrauchte Atwoodsche Fallmaschine. Sie besteht aus einer festen Rolle, über die eine Schnur läuft, an der auf einer Seite ein Gewicht von der Masse M, auf der anderen ein etwas größeres M + m hängt. Das größere Gewicht bewegt sich nach unten, das kleinere nach oben; wir fragen: mit welcher Beschleunigung bewegen sich die Gewichte? Wenn Ruhe herrschen sollte, müßten an beiden Schnüren gleich große wirkliche Kräfte nach abwärts wirken; wenn nun Bewegung eintritt, so müssen nach d'Alembert die nach unten wirkenden Schwerkräfte vermehrt um die Trägheitskräfte an beiden Schnüren gleich sein.

An der Masse M wirkt nach unten die Schwerkraft Mg und weil die Bewegung nach oben erfolgt, ebenfalls nach unten die Trägheitskraft Mw., im ganzen also die Kraft M(g + w); an der Masse M + m wirkt nach unten die Schwerkraft (M + m)g; die Trägheitskraft (M + m)w wirkt aber, weil die Bewegung nach unten erfolgt, nach oben, so daß die Gesamtkraft, die nach unten wirkt, (M + m) (g—w) beträgt. Es muß also sein:

$$M(g + w) = (M + m)(g - w)$$

daraus folgt:

$$w = \frac{m}{2M + m} g \quad . \; . \; . \; . \; . \; 81)$$

Die Beschleunigung auf der Fallmaschine ist also proportional dem Verhältnis des Uebergewichtes m zum Gesamtgewichte 2M + m, das überhaupt in Bewegung gesetzt wird. Die in den Lehrbüchern für diese Formel gegebenen Begründungen sind oft wenig überzeugend.

25. Bewegung starrer Körper. Ein starrer Körper ist, wie die Statik lehrt (s. den Artikel „Gleichgewicht") dann im Gleichgewicht, wenn 1. die Vektorsumme aller auf ihn wirkenden Kräfte den Wert Null hat, und überdies 2. die Vektorsumme der Drehmomente aller auf ihn wirkenden Kräfte ebenfalls den Wert Null hat. Die Bewegungsgesetze eines starren Körpers können wir nun wieder aus den Bedingungen für das Gleichgewicht nach dem d'Alembertschen Prinzip bestimmen. Er bewegt sich

so, daß die durch die Bewegung erzeugten Trägheitskräfte den äußeren Kräften das Gleichgewicht halten. Dann muß nach der ersten Gleichgewichtsregel die Vektorsumme aus allen äußeren und Trägheitskräften gleich Null sein. Die Folgerung aus Regel 2 siehe im Artikel „Drehbewegung“. Wir denken uns den starren Körper aus n starr verbundenen Massenpunkten mit den Massen $m_1, m_2, \ldots, m_n$ zusammengesetzt; die auf diese Massen wirkenden äußeren Kräfte seien bezw. $\mathfrak{K}_1, \mathfrak{K}_2, \ldots, \mathfrak{K}_n$; die Beschleunigungen der Punkte: $\mathfrak{w}_1, \mathfrak{w}_2, \ldots, \mathfrak{w}_n$; dann ist die auf den k-ten Punkt wirkende Trägheitskraft $-m_k \mathfrak{w}_k$ und die Beschleunigungen müssen, wenn die Trägheitskräfte den äußeren Kräften das Gleichgewicht halten sollen, die Bedingung erfüllen:

$$-m_1 \mathfrak{w}_1 - m_2 \mathfrak{w}_2 - \ldots - m_n \mathfrak{w}_n + \mathfrak{K}_1 + \mathfrak{K}_2 + \ldots \mathfrak{K}_n = 0 \quad . \quad . \quad . \quad 82)$$

Nun ist, wenn $\mathfrak{v}_1, \ldots, \mathfrak{v}_n$ die Geschwindigkeiten der Punkte sind:

$$J = m_1\mathfrak{v}_1 + m_2\mathfrak{v}_2 + \ldots + m_n \mathfrak{v}_n$$

der Gesamtimpuls des Körpers. Daher ist, wenn wir die Beschleunigung durch die Geschwindigkeiten (nach Abschnitt 8, Gl. 33) näherungsweise ausdrücken:

$$m_1 \mathfrak{w}_1 + m_2 \mathfrak{w}_2 + \ldots + m_n \mathfrak{w}_n \sim \frac{J^{(1)} - J^{(0)}}{t_1 - t_0}$$

wo $t_1 - t_0$ ein kleines Zeitintervall, $J(^0)$, $J(^1)$ die Werte des Impulses am Anfang bezw. Ende dieses Intervalles sind. Setzen wir Beziehung (82) zwischen den Beschleunigungen und den äußeren Kräften ein, so erhalten wir:

$$J(^1) - J(^0) = \mathfrak{K}(t_1 - t_0) \quad . \quad . \quad 83)$$

wenn wir mit $\mathfrak{K}$ die Vektorsumme der äußeren Kräfte bezeichnen. Die Zunahme des Impulses eines starren Körpers ist also gleich dem Antrieb der Resultierenden der äußeren Kräfte. Nun ist aber der Impuls eines beliebigen Massensystems gleich dem Impuls eines Massenpunktes, der sich im Schwerpunkt des Systems befindet, und zur Masse die Gesamtmasse des Systems hat. Nennen wir M die Gesamtmasse des starren Körpers, $\mathfrak{v}$ die Geschwindigkeit des Schwerpunktes, so ist der Impuls des Schwerpunktes:

$$J = M\mathfrak{v}$$

und es gilt nach dem eben Gesagten die Gleichung:

$$M(\mathfrak{v}^{(1)} - \mathfrak{v}^{(0)}) \sim \mathfrak{K}(t_1 - t_0),$$

oder:

$$M \frac{\mathfrak{v}^{(1)} - \mathfrak{v}^{(0)}}{t_1 - t_0} \sim \mathfrak{K}. \quad . \quad . \quad . \quad 84)$$

Der Quotient auf der linken Seite geht aber, wenn wir nun das Zeitintervall t_0, t_1 und genügend klein wählen, in die Beschleunigung $\mathfrak{w}$ über; dann gilt die exakte Gleichung:

$$M\mathfrak{w} = \mathfrak{K} \quad 82)$$

d. h. der Schwerpunkt bewegt sich wie ein freier Massenpunkt von der Gesamtmasse des Körpers, auf den alle am Körper angreifenden Kräfte wirken. Der Schwerpunkt eines starren Körpers verhält sich also so, wie der eines mechanischen Systems, in dem nur innere Kräfte wirken (s. unter III Abschnitt 20).

So bewegt sich z. B. der Schwerpunkt eines Geschosses wie ein materieller Punkt beim Wurfe nach den im Abschnitt 10 (Gleichung 58) aufgestellten Formeln.

Die Bewegung der starren Körper um ihren Schwerpunkt wird im Artikel „Drehbewegung“ behandelt.

26. Zyklische und stationäre Bewegungen. Stabilität von Bewegungen. Wir nennen eine Bewegung eines Massensystems eine zyklische, wenn jede Masse, die eine Stelle verläßt, sofort wieder durch eine gleiche Masse von gleicher Geschwindigkeit ersetzt wird. Ein Beispiel dafür bietet etwa eine homogene zylindrische Walze, die mit gleichförmiger Geschwindigkeit um die durch ihre Mitte gehende Achse rotiert; oder eine Flüssigkeit, die mit konstanter Geschwindigkeit einen kreisförmigen Kanal durchströmt. Die Drehung eines Rades und ähnliche Bewegungen, die nicht exakt zyklisch sind, weil wegen der Zwischenräume der Speichen nicht jede Masse sofort ersetzt wird, wo aber doch dieser Ersatz in regelmäßigen Intervallen stattfindet, nennt man eine nahezu zyklische. Wenn das System n Freiheitsgrade hat, so läßt sich die Bewegung durch die Aenderung von n lagebestimmende Größen (Koordinaten) beschreiben. Wenn bei Aenderung einer Koordinate mit Konstanthaltung aller anderen eine zyklische Bewegung entsteht, heißt erstere eine zyklische Koordinate. Wenn etwa eine sich drehende Walze sich noch gleichzeitig im Raum bewegt, so ist nur ihr Drehungswinkel eine zyklische Koordinate. Ein System, das nur eine zyklische Koordinate hat, heißt ein Monozykel, z. B. die erwähnte Walze. Wenn zwei zyklische Koordinaten vorhanden sind, wenn z. B. zwei Walzen im Gang sind, die unabhängig voneinander laufen, so heißt das System ein Bizykel, im allgemeinen Falle bei beliebiger Anzahl zyklischer Koordinaten ein Polyzykel.

Wenn sich auch die nichtzyklischen Koordinaten ändern, kann die Bewegung keine streng zyklische mehr sein. Denn dadurch, daß sich z. B. die rotierende Walze im Raum bewegt, tritt bei der Drehung nicht mehr exakt ein Teilchen an die Stelles eines Vorgängers. Doch nennt man auch solche Bewegungen noch zyklische, wenn die Aenderung der nichtzyklischen Koordinaten gegen-

über der der zyklischen sehr langsam erfolgt, wenn also die Walze, in rascher Rotation, langsam durch den Raum bewegt wird. Ein Beispiel hierfür ist das Tanzen eines Kinderkreisels.

Man trennt daher die Koordinaten bei einer zyklischen Bewegung in zyklische und langsam veränderliche Koordinaten. Von den Werten der zyklischen Koordinaten hängt der Zustand des Systems nicht ab, weil ja die Konfiguration durch die Aenderung nicht beeinflußt wird; sondern nur die Aenderungsgeschwindigkeit derselben, z. B. die Drehungsgeschwindigkeit des Kreisels ist von Einfluß auf das mechanische Verhalten. Für die langsam veränderlichen Koordinaten gilt genau das Umgekehrte.

Man hat versucht, durch zyklische Bewegung der Moleküle die Wärmeeigenschaften der Körper zu erklären (Helmholtz). Je rascher sich die zyklischen Koordinaten ändern, desto größer sollte die Temperatur des Körpers sein; die Koordinaten, welche die Lage der Körper im Raum festlegten, spielen dabei die Rolle der langsam veränderlichen Koordinaten. Und in der Tat müßte man sich ja die Wärmebewegung der Moleküle als sehr rasch gegenüber der sichtbaren Bewegung der Körper vorstellen. Maxwell und Boltzmann haben auch die elektrischen Erscheinungen in ähnlicher Weise zu erklären versucht.

Was wir hier zyklische Bewegung genannt haben, wird auch oft, insbesondere in der Lehre von den Flüssigkeitsbewegungen, als stationäre Bewegung bezeichnet. Es ist zu beachten, daß der Ausdruck stationär noch in einem anderen in II 13 erörterten Sinne gebraucht wird.

Zur Charakterisierung einer Bewegung ist wichtig, wie sich das Bewegte verhält, wenn ihm ein plötzlicher Stoß erteilt wird, oder die äußeren Kräfte eine plötzliche Aenderung erfahren, oder wie man zusammenfassend sagt, wenn die Bewegung eine Störung erleidet. Wenn bei einer noch so kleinen Störung der Körper seine alte Bahn vollständig verläßt und nie mehr in ihre Nähe zurückkehrt, heißt die ursprüngliche (ungestörte) Bewegung eine instabile. Wenn aber dadurch, daß die Störung genügend klein gewählt wird, erreicht werden kann, daß das Bewegte immer in beliebiger Nähe der ursprünglichen Bahn bleibt, heißt diese ursprüngliche Bewegung eine stabile. So führt eine schwere Kugel, die in einer Rinne dahinrollt, eine stabile Bewegung aus, weil sie nach einem genügend kleinen Stoß in die Rinne zurückrollt und eine um ihre ursprüngliche Bahn hin- und herpendelnde neue beschreibt. Rollt hingegen die Kugel auf dem Grat eines Gebirges dahin, oder geometrisch gesprochen, auf einer gegen oben gelegenen Seitenlinie eines Zylinders, so wird schon ein noch so kleiner Stoß sie vollkommen aus der Bahn schleudern, wohin sie nie mehr zurückkehrt. Die Untersuchungen, ob eine bestimmte Bewegung stabil ist, gehören zu den schwierigsten der Mechanik.

27. Relativbewegung bei geradlinig bewegtem Bezugskörper. Relativitätsprinzip. Die bisher aufgestellten Bewegungsgesetze gelten nur, wenn sie auf einen Fundamentalkörper (s. III Abschnitt 15) als Bezugskörper bezogen werden; sie gelten, wie man kurz sagt, für absolute Bewegungen. Es interessieren uns aber auch häufig die Bewegungen von Körpern relativ zu irgendwelchen anderen Bezugskörpern (etwa zu Fahrzeugen oder zu der in Drehung befindlichen Erde); solche Bewegungen nennt man kurz: Relativbewegungen. Wir wollen nun einige Bewegungsgesetze für Relativbewegungen aufstellen. Es sei S ein Fundamentalkörper und S′ ein anderer Körper, der in geradliniger (aber nicht notwendig gleichförmiger) Translationsbewegung relativ zu S begriffen ist. Wir nennen die Geschwindigkeit $\mathfrak{v}$ eines Punktes relativ zu S seine absolute Geschwindigkeit, die Geschwindigkeit $\mathfrak{v}'$ relativ zu S′ seine Relativgeschwindigkeit und die Geschwindigkeit $\bar{\mathfrak{v}}$ des Bezugskörpers S′ relativ zu S die Fahrzeuggeschwindigkeit. Analoge Bedeutung mögen die Beschleunigungen $\mathfrak{w}, \mathfrak{w}', \bar{\mathfrak{w}}$ haben; dann gelten nach den Regeln über die Zusammensetzung von Bewegungen (Abschnitt 10) die Beziehungen:

$$\mathfrak{v} = \mathfrak{v}' + \bar{\mathfrak{v}}, \quad \mathfrak{w} = \mathfrak{w}' + \bar{\mathfrak{w}} \quad . \quad 85)$$

Die Bewegungsgleichung von P in bezug auf S lautet:

$$m\mathfrak{w} = \mathfrak{K};$$

nun ist aber wegen Gleichung (85):

$$m\mathfrak{w}' = \mathfrak{K} - m\bar{\mathfrak{w}} \quad . \quad . \quad . \quad 86)$$

Die Bewegungsgleichung in bezug auf das „Fahrzeug“ S′ hat also dieselbe Form wie in bezug auf das Fundamentalsystem, wenn man zur wirklichen Kraft $\mathfrak{K}$ eine fingierte Kraft:

$$\mathfrak{K}_r = -m\bar{\mathfrak{w}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 87)$$

hinzufügt, diese Kraft $\mathfrak{K}_r$ heißt Reduktionskraft, weil sie die Bewegungsgleichungen für das Fahrzeug S′ auf die normale Form reduziert; sie ist gleich der Trägheitskraft, die auf die Masse m wirken würde, wenn sie an der Bewegung des Fahrzeuges teilnähme. Die der Reduktionskraft gleiche, aber entgegengesetzt gerichtete Kraft $\mathfrak{K}_f = m\bar{\mathfrak{w}}$ bezeichnet man als Führungskraft. Der Grund dafür ist folgender: um der Masse m die Absolutbeschleunigung $\mathfrak{w}$ zu erteilen, bedarf es einer Kraft $m\mathfrak{w} = \mathfrak{K}$; dieselbe Kraft erzeugt aber eine Relativbeschleunigung $\mathfrak{w}' = \mathfrak{w} - \bar{\mathfrak{w}}$; um nun eine Relativbeschleunigung $\mathfrak{w}$ zu erteilen, bedarf es einer größeren

Kraft; es muß zur Kraft $\mathfrak{K}$ noch die Führungskraft $\mathfrak{K}_f = m\mathfrak{w}$ hinzutreten; die Kraft $\mathfrak{K} + \mathfrak{K}_f$ erzeugt die absolute Beschleunigung $\frac{\mathfrak{K} + \mathfrak{K}_f}{m} = \mathfrak{w} + \mathfrak{w}$, also die gewünschte Relativbeschleunigung $\mathfrak{w}$; der Punkt P muß mit Hilfe der Kraft $\mathfrak{K}_f$ „geführt" werden.

Falls die Fahrzeugsbeschleunigung 0 ist, also die Bewegung von S′ eine gleichförmige, verschwinden Reduktions- und Führungskraft; es gilt dann also für die Relativbewegung dasselbe Newtonsche Kraftgesetz wie für die absolute, d. h. jedes relativ zu einem Fundamentalsystem S geradlinig gleichförmig bewegte System S′ ist auch ein Fundamentalsystem; man kann daher an den Bewegungsgesetzen relativ zu einem System S nicht erkennen, ob es in absoluter Ruhe ist oder in gleichförmig geradliniger Bewegung.

Dieser Satz heißt das Relativitätsprinzip der Mechanik.

Ein Beispiel für das Auftreten einer Reduktionskraft ist folgendes: In einem Eisenbahnwagen S′ sei eine Hängelampe angebracht, die in Schwingungen gerät. So lange der Wagen S′ relativ zum Erdboden S ruht, schwingt die Lampe symmetrisch nach beiden Seiten, wie ein nur unter dem Einfluß der Schwere stehendes Pendel. Wenn sich der Wagen nun in Bewegung setzt, geschehen die Schwingungen für einen mitfahrenden Passagier, also die Relativbewegungen, so, daß die Ausschläge in der Bewegungsrichtung des Wagens schwächer sind als in der entgegengesetzten; die Lampe schwingt symmetrisch um einen hinter dem Aufhängepunkt liegenden Punkt. Es ist so, als würde außer der Schwerkraft noch eine horizontale nach rückwärts wirkende Kraft auf die Lampe wirken. Diese ist die Reduktionskraft und gleich dem Trägheitswiderstand der Lampe, die sich gegen die Fahrzeugbewegung sträubt. Wenn der Wagen wieder gleichförmig sich bewegt, werden, wie das Relativitätsprinzip es fordert, die Lampenschwingungen wieder symmetrisch. Beim Bremsen der Bewegung sind wieder nach vorn stärkere Ausschläge zu bemerken.

Ein Beispiel für die Führungskraft ist folgendes: Solange ein Wagen steht, braucht man keine Kraft anzuwenden, um relativ zu ihm sich im Gleichgewicht zu halten, d. h. die Beschleunigung Null zu erzeugen. Wenn der Wagen aber anfährt, wird man nach rückwärts geschleudert, wenn man nicht eine nach vorwärts gerichtete Kraft auf den Körper ausübt, etwa durch Anstemmen an eine Rücklehne oder ähnliches. Diese Kraft, welche die frühere Absolutbeschleunigung Null jetzt auch als Relativbeschleunigung erhalten soll, ist die Führungskraft. Sie verschwindet, wenn der Wagen wieder gleichförmig fährt; man kann dann ohne Kraftaufwand ruhig stehen.

Ueber die Relativbewegung bei sich drehendem Bezugskörper vgl. den Artikel „Drehbewegung".

Literatur. *Die Abschnitte über Mechanik in den Lehrbüchern der allgemeinen Physik. Besonders hervorgehoben seien:* ***H. Chwolson,*** *Lehrbuch der Physik, Bd. I, Braunschweig 1902. —* ***A. Höfler,*** *Physik, Braunschweig 1904. —* ***A. Lampa,*** *Lehrbuch der Physik, Wien und Leipzig 1908. —* ***H. Weber und Wellstein,*** *Enzyklopädie der Elementarmathematik, Bd. III, Angewandte Elementarmathematik, Leipzig 1907. —* ***A. Winkelmann,*** *Handbuch der Physik, Bd. I, Leipzig 1908. — Schriften, die im wesentlichen ohne Vorkenntnisse in der höheren Mathematik verständlich sind:* ***L. Lange,*** *Geschichte und Entwicklung des Bewegungsbegriffes, Leipzig 1886. —* ***E. Mach,*** *Die Mechanik und ihre Entwicklung. 6. Aufl. Leipzig 1908. —* ***J. Cl. Maxwell,*** *Substanz und Bewegung. Braunschweig 1879. —* ***A. Tesar,*** *Die Mechanik. Leipzig 1909. — Schriften, zu deren Verständnis die Kenntnis der Elemente der Differential- und Integralrechnung notwendig sind: Enzyklopädie der mathematischen Wissenschaften, Bd. IV, 1, Mechanik, Leipzig 1901—1908. Besonders sei auf die Artikel von* ***Voss, Stäckel*** *und* ***Schönfliess*** *hingewiesen. —* ***A. Föppl,*** *Technische Mechanik, Bd. I, Einführung in die Mechanik (in Vektorenrechnung). Leipzig 1905. —* ***H. Helmholtz,*** *Vorlesungen über theoretische Physik, Bd. I, 2, Dynamik diskreter Massen. Leipzig 1898. —* ***G. Hamel,*** *Elementare Mechanik. Leipzig 1912.*

Ph. Frank.

Bewegung.

Allgemeine Physiologie der Bewegung.

nungen bei Einwirkung äußerer Reize: aa) Morphologische Erscheinungen. bb) Chemische Erscheinungen. cc) Physikalisch-energetische Erscheinungen. b) Theorien der Protoplasmabewegung. III. Flimmerbewegung: a) Tatsächliche Erscheinungen: α) Erscheinungen beim Fehlen äußerer Reize: aa) Morphologische Erscheinungen. bb) Chemische Erscheinungen. cc) Physikalisch - energetische Erscheinungen. β) Erscheinungen bei Einwirkung äußerer Reize: aa) Morphologische und physikalisch-energetische Erscheinungen. bb) Chemische Erscheinungen. b) Theorien der Flimmerbewegung.

1. Uebersicht. 1 a) Die hier behandelten Bewegungsarten lebendiger Systeme. Von Bewegungen kommen bei lebendigen Systemen (über diese vgl. den Artikel „Leben") sehr viele und verschiedenartige vor. Innerhalb der Gesamtheit von Bewegungen können wir zunächst die Massenbewegungen den Einzelbewegungen kleinster Teilchen (Moleküle, Atome, Ionen, Elektronen), wie Diffusionsbewegungen usw. gegenüberstellen. Bei den Massenbewegungen ferner haben wir aktive und passive zu unterscheiden. Unter ersteren wollen wir solche Bewegungen von Zellen und überhaupt von lebendigen Systemen verstehen, bei denen die Bewegung jeder einzelnen Zelle ganz vorwiegend nur durch den Energiegehalt dieser Zelle selbst hervorgerufen wird. Dagegen sind passive Bewegungen alle diejenigen, bei denen die ganze Energie, welche eine Zelle bzw. ein lebendiges System in Bewegung setzt, oder wenigstens ein beträchtlicher Teil dieser Energie aus der Umgebung der bewegten Massen stammt.

Passive Bewegungen typischer Art sind diejenigen des Blutes, der Lymphe, des Harns, des Darminhalts, der Knochen; ferner aber gehören auch hierher die Bewegungen durch Aenderung des spezifischen Gewichts eines lebendigen Systems, durch Wasseraufnahme und Abgabe von Wasser, wie es bei den Bewegungen durch Turgoränderungen der Pflanzenzellen und durch Quellung und Entquellung der Zellwände der Fall ist usw. (über diese Bewegungsarten siehe Näheres bei M. Verworn, Allgemeine Physiologie, 5. Aufl., Jena 1909, S. 266ff).

Unter den aktiven Bewegungen stehen in erster Reihe diejenigen des Muskels und verwandter Gebilde, die Protoplasmabewegung und die Flimmerbewegung nebst Verwandtem. Außerdem gehören zu den aktiven Bewegungen diejenigen der sich teilenden Zellen, der sekretbildenden Drüsenzellen, der durch Sekretbildung sich fortbewegenden Algen, zum Teil die beim Wachstum besonders der Pflanzenzellen auftretenden Bewegungen usw. (vgl. hierüber W. Pfeffer, Pflanzenphysiologie, Bd. II, Leipzig 1904). Im folgenden soll nur von der Muskelbewegung, der Protoplasmabewegung und der Flimmerbewegung als den typischsten und im Organismenreich am meisten verbreiteten Arten aktiver Bewegung die Rede sein.

1 b) Kontraktionsbewegungen und Kontraktilität. Die meisten Autoren sehen die Muskel-, Protoplasma- und Flimmerbewegung als nah verwandt an und fassen alle derartigen Bewegungsarten unter der Bezeichnung der Kontraktionsbewegungen zusammen. Und dementsprechend wird die Fähigkeit lebendiger Systeme, Kontraktionsbewegungen zu zeigen, als Kontraktilität bezeichnet.

Die Kontraktilität kann man definieren als die Fähigkeit aktiver Lageverschiebungen der Teilchen der Grundmasse des Protoplasmas und ihrer Differenzierungen (wie Muskelfibrillen, Myoide und Cilien), welche zu Mitbewegungen verschiedener geformter Bestandteile des Protoplasmas (wie Zellkerne, Granula, Vakuolen) und in der Regel zu Formänderungen und häufig zu Ortsveränderungen des ganzen Systems führen (siehe hierüber P. Jensen, Protoplasmabewegung. In Ergebn. d. Physiol. Bd. I Wiesbaden 1902 S. 4).

Eine solche Kontraktilität, welche man in irgendeinem höheren oder geringeren Maße jedem Protoplasma zuerkennen kann, ist in den Muskeln, dem Protoplasma der Sarkodinen (Näheres hierüber unten S. 1065 f.) und mancher Pflanzenzellen und in den Flimmerzellen in besonders hohem Grade ausgebildet.

Man hat die „Kontraktilität" wohl auch derart definiert, daß in ihrer Begriffsbestimmung schon gewisse theoretische Erklärungsmomente der Kontraktionsbewegungen enthalten sind, welche einerseits in der Annahme eines bestimmten Aggregatzustandes der „kontraktilen Substanz", der bald „fest" bald „flüssig" sein sollte, andererseits in der Voraussetzung eines und desselben Mechanismus' bei allen Kontraktionsbewegungen bestehen. Gegen derartige Fassungen des Begriffes „Kontraktionsbewegung" und „Kontraktilität" hat neuerdings besonders Biedermann Einspruch erhoben (vgl. W. Biedermann, Vergleichende Physiologie der irritablen Substanzen. In Ergebn. d. Physiol., Bd. VIII 1909 S. 38ff.); er leugnet eine nahe Verwandtschaft der Muskelbewegung und Protoplasmabewegung und will die Bezeichnungen „Kontraktionsbewegung" und „Kontraktilität" nur auf die seiner Meinung nach „festen" Fibrillen des Muskels usw. und nicht auf das „flüssige" Protoplasma der Rhizopoden usw. angewandt wissen.

Die von mir oben gegebene Definition von Kontraktionsbewegung und Kontraktilität macht keine bestimmten Voraussetzungen

über den Aggregatzustand der kontraktilen Substanz und über den Mechanismus der Bewegung, so daß sie gleichzeitig die Muskel-, Protoplasma- und Flimmerbewegung umfassen kann, ohne von dem Einspruch Biedermanns getroffen zu werden. Ich möchte an diesem Gebrauch der Bezeichnung Kontraktionsbewegung usw. vorläufig festhalten, um damit das Gemeinsame, was die Muskel-, Protoplasma- und Flimmerbewegung in ihrer äußeren Erscheinungsweise hat, zum Ausdruck zu bringen.

2. Allgemeine Charakteristik und ökologische Bedeutung[1]) der Kontraktionsbewegungen. Die „kontraktilen Systeme", wie wir die mit hervorragend ausgeprägter Kontraktilität ausgestatteten Systeme kurz nennen wollen, sind dadurch ausgezeichnet, daß unter ihren Lebenserscheinungen die Produktion von Bewegungsenergie besonders auffällig ist. Bei denjenigen einzelligen kontraktilen Systemen, bei denen eine weitergehende Arbeitsteilung noch nicht vorliegt, tritt neben dieser Energieproduktion auch der Stoffwechsel („vegetative Funktionen" wie Nahrungsaufnahme, Verdauung usw.) deutlich in die Erscheinung. Dagegen ist bei den kontraktilen Systemen mehrzelliger Organismen die Kontraktilität das Ergebnis einer einseitigen funktionellen Differenzierung; in diesen Fällen gehören die kontraktilen Systeme zu den „animalen" Systemen (vgl. den Artikel „Leben"), für die es charakteristisch ist, daß die mit dem lebendigen Stoffwechsel engverbundenen Energieänderungen des lebendigen Systems besonders auffällig sind; und zwar ist bei den kontraktilen Systemen die Produktion von Bewegungsenergie die äußerlich am meisten hervortretende Lebenserscheinung

Kontraktionsbewegungen sind stets der Ausdruck von „Erregungen", d. h. gewisser „physiologischer Schwankungen" der „stationären" Lebensprozesse, d. h. der Prozesse des „ruhenden" lebendigen Systems (vgl. den Artikel „Leben"). Solche Schwankungen oder fluktuierende Störungen des Stoff- und Energiewechselgleichgewichts des lebendigen Systems treten beim Muskel nur unter Einwirkung von Reizen auf, bei anderen kontraktilen Systemen aber (z. B. bei Sarkodinen) schon unter Bedingungen, die für den Muskel „Ruhebedingungen" sind (vgl. den Artikel „Leben").

Die Kontraktionsbewegungen sind bei höheren Organismen sehr häufig auch mit „psychischen" Prozessen verbunden, nämlich da, wo sie unter Mitwirkung des Gehirns stattfinden. Hierbei tritt im allgemeinen zunächst in einem Sinnes-Apparat ein mit „psychischen" Erscheinungen einhergehender Erregungsprozeß auf und diesem folgt dann ein Erregungsprozeß in einem motorischen (neuro-muskulären) Apparat, der entsprechend der Arbeitsteilung im Organismus so beschaffen ist, daß wir bei ihm ein Auftreten von etwas „Psychischem" nicht anzunehmen pflegen. Wo aber sensible und motorische Apparate noch nicht gegeneinander differenziert sind, wie z. B. bei niederen Organismen, die Protoplasma- und Flimmerbewegung zeigen, da könnte man sich vorstellen, daß hier mit den Erregungen, die zu Kontraktionsbewegungen führen, zugleich auch ganz primitive „psychische" Vorgänge verbunden seien (Näheres S. 1071 und 1077).

Die ökologische Bedeutung der Kontraktionsbewegungen ist eine sehr große. Sobald nämlich die stationären oder Ruheprozesse des lebendigen Systems für dessen Erhaltung oder beste Haushaltsführung nicht mehr ausreichen, dann sind im allgemeinen die Bedingungen gegeben für das Zustandekommen physiologischer Schwankungen, die sich bei den kontraktilen Systemen besonders in den Kontraktionsbewegungen äußern. Diese Kontraktionsbewegungen führen dann teils zu Aenderungen der gegenseitigen Lage der Teile eines lebendigen Systems teils zur Ortsbewegung des ganzen Systems. Dadurch werden lauter für den Lebenshaushalt günstige Vorgänge bewerkstelligt, wie: Hinbewegung zu Nahrungsstoffen oder Heranholen von solchen, ihre Aufnahme, Bearbeitung und Fortbewegung innerhalb des lebendigen Systems, die Fortbewegung und Ausscheidung von Stoffwechselprodukten und Abfällen, das Aufsuchen der verschiedensten günstigen äußeren Bedingungen, die Abwehr- und Fluchtbewegungen bei ungünstigen äußeren Bedingungen usw.

3. Die drei Haupttypen der Kontraktionsbewegungen. Wie schon angedeutet, bestehen erhebliche Unterschiede zwischen der Muskelbewegung, Protoplasmabewegung und Flimmerbewegung. Wir wollen unsere Darstellung mit der Muskelbewegung beginnen, da sie die bekannteste und hervortretendste Form der Bewegung ist. In gewisser Hinsicht sind hier auch die Verhältnisse am typischsten und übersichtlichsten, wenn sie auch in anderen Punkten komplizierter erscheinen als bei der Protoplasma- und Flimmerbewegung. Bei der Besprechung aller dieser Bewegungen wollen wir mit den tatsächlich festgestellten Erscheinungen beginnen und uns dann jedesmal zu den Erklärungsversuchen desselben resp. den Theorien wenden.

I. Muskelbewegung. Um ein mög-

---

[1]) d. h. die Bedeutung für die Erhaltung und den Haushalt des Lebens eines Systems.

lichts tiefgehendes Verständnis für die Muskelbewegung zu gewinnen, ist es erforderlich, die Gesamtheit der Lebenserscheinungen des Muskels, nicht allein seine Bewegungserscheinungen, ins Auge zu fassen: also die wesentlichen morphologischen, chemischen und physikalisch-energetischen Erscheinungen. Denn die Bewegungserscheinungen sind nur ein Glied, das in dem komplizierten Zusammenhang aller dieser Erscheinungen unter bestimmten Bedingungen auftritt und das für sich allein nicht verständlich ist.

Ehe wir auf die Bewegungen eingehen, die der Muskel bei der als „Erregung" oder „Tätigkeit" bezeichneten Form der physiologischen Schwankungen seiner stationären Lebensprozesse darbietet, müssen wir die Erscheinungen betrachten, die er ohne Bewegung, d. h. in der „Ruhe" zeigt. Und zwar wollen wir nacheinander seine morphologischen chemischen und physikalisch-energetischen Erscheinungen behandeln. Dann sollen in derselben Weise die tatsächlichen Erscheinungen geschildert werden, durch die sich der in Bewegung befindliche, also erregte Muskel von dem nicht bewegten, ruhenden, unerregten unterscheidet. Und endlich werden wir nachsehen, wie sich aus diesen tatsächlichen Beobachtungen unter Zuziehung allgemein-physiologischer Vorstellungen eine Theorie oder Theorien der Muskelbewegung aufbauen lassen.

Da wir unter den Muskeln recht verschiedene Formen vorfinden und da es außerdem noch manche muskelähnliche Gebilde gibt, so müssen wir hier eine Auswahl treffen: Ausführlicher soll nur die Bewegung der Muskeln κατ εξοχηv, nämlich der „quergestreiften", willkürlichen oder Skelettmuskeln, hier behandelt werden und über die anderen verwandten Gebilde, wie Herzmuskel, glatte Muskeln, Myoide u. a. nur ein kurzer Ueberblick gegeben werden.

a) Quergestreifte oder willkürliche Muskeln. *α*) Tatsächliche Erscheinungen. Die quergestreiften Muskeln stellen die Hauptmasse aller Muskeln dar. Sie greifen im allgemeinen an den Skelettteilen der Wirbeltiere und den äußeren Hartgebilden der Wirbellosen (Chitinpanzer usw.) an und dienen den Bewegungen der Extremitäten, des Kopfes, Rumpfes usw. Ihre Bewegungen sind bei den höheren Tieren vom Willen abhängig oder mit anderen Worten: die Bewegungen können vom Großhirn aus „spontan" hervorgerufen, verändert und unterdrückt werden.

aa) Erscheinungen des ruhenden Muskels. Da, wie erwähnt, die Erscheinungen des sich bewegenden Muskels nur verstanden werden können, wenn wir wissen, was im ruhenden Muskel vorgeht und die Grundlage seiner Bewegungsfähigkeit, d. h. seiner Kontraktilität abgibt, so wollen wir hierauf zunächst einen Blick werfen.

αα) Morphologische Erscheinungen. Hierher gehört alles, was über die makroskopische und mikroskopische Anatomie (Histologie) des quergestreiften Muskels bekannt ist. Davon können an dieser Stelle aber nur die Haupttatsachen hervorgehoben werden: Die kontraktile Substanz jedes Muskels ist aus zahlreichen fadenförmigen Muskelfasern aufgebaut, die gewöhnlich makroskopische Dimensionen und im allgemeinen die Länge des Gesamtmuskels haben. An der Muskelfaser, die als vielkernige Zelle aufgefaßt werden kann, unterscheidet man eine bindegewebige Hülle, das Sarkolemm, und den Faserinhalt. Dieser ferner besteht einerseits aus dem Sarkoplasma, das der protoplasmatischen Grundmasse (Cytoplasma) anderer Zellen entspricht, andererseits hauptsächlich aus zweierlei in das Sarkoplasma eingebetteten Gebilden, nämlich mehreren Zellkernen und den sehr zahlreichen Muskelfibrillen; daneben mögen noch gewisse nicht immer vorkommende körnige Gebilde, die Sarkosomen, genannt werden, die in besonders leistungsfähigen Muskeln am zahlreichsten zu sein pflegen. Da die Muskelfibrillen als die Hauptträger der Kontraktilität angesehen werden müssen, so haben wir sie vornehmlich noch etwas näher zu betrachten.

Die Muskelfibrillen sind nur bei mikroskopischer Vergrößerung zu erkennen, und zwar als äußerst feine, in der Längsrichtung der Muskelfaser verlaufende, untereinander parallele Fäden, die stärker lichtbrechend sind als das Sarkoplasma und die ganze Faser mehr oder minder längsgestreift erscheinen lassen. Die Fibrillen selbst ferner sind quergestreift, d. h. sie bestehen in regelmäßigem Wechsel aus hauptsächlich zwei verschieden stark lichtbrechenden Schichten. Die stärker lichtbrechenden sind erheblich höher als die anderen, erscheinen bei tiefer Einstellung des Mikroskops dunkel (bei hoher Einstellung hell) und zeigen sich im polarisierten Licht doppelbrechend (anisotrop); die schwächer lichtbrechenden Schichten sind bei tiefer Einstellung des Mikroskops (die künftig immer zugrunde gelegt ist) hell und im polarisierten Lichte einfachbrechend (isotrop). Bei näherer Untersuchung lassen sich an den Fibrillen noch weitere Schichten erkennen, von denen hier jedoch abgesehen sei; bezüglich einiger von ihnen sind die Ansichten der Autoren auch noch geteilt, obgleich hierüber sehr viele Untersuchungen vorliegen.

Durch den geschilderten Bau der Fibrillen

erhält auch die ganze Muskelfaser ihre charakteristische Querstreifung, d. h. sie zeigt unter dem Mikroskop durch die ganze Breite der Faser abwechselnd dunkle und helle Querbänder. Diese kommen dadurch zustande, daß die dunklen Schichten der nebeneinander verlaufenden Fibrillen immer wieder neben dunkle und die hellen neben helle Abschnitte zu liegen kommen. Aus der Tatsache, daß sich diese regelmäßige Anordnung im allgemeinen so genau erhält, hat man wohl mit einigem Recht gefolgert, daß Querverbindungen zwischen den einzelnen Fibrillen vorhanden seien, die Längsverschiebungen ihrer Schichten verhindern.

$\beta\beta$) Chemische Erscheinungen. Von solchen kommen in Betracht die chemische Zusammensetzung und die chemischen Prozesse, d. h. der Stoffwechsel des ruhenden Muskels (vgl. den Artikel „Leben").

Bezüglich der chemischen Zusammensetzung gilt im wesentlichen das für die Zellsubstanz im allgemeinen Ausgeführte (vgl. den Artikel „Leben"). Es mag hier nur noch bemerkt werden, daß der Muskel durchschnittlich etwa 75% Wasser enthält und daß unter den übrigen Stoffen die Proteinsubstanzen mit etwa 19% vorherrschen. Die chemische Reaktion des ruhenden Muskels ist alkalisch bezw. amphoter.

Der Stoffwechsel des ruhenden Muskels zeigt sich deutlich erst bei etwas länger dauernder Beobachtung. Dann findet man, daß der Muskel, wie jedes lebendige System, Nahrungsstoffe mit Einschluß von Sauerstoff verbraucht und Stoffwechselprodukte (CO_2 usw.) liefert.

$\gamma\gamma$) Physikalisch-energetische Erscheinungen. In erster Linie interessieren uns hier die mechanischen Eigenschaften des Muskels, da von ihnen in besonderem Maße die Bewegungen abhängen. Auf seine Elastizität bezw. Dehnbarkeit braucht nicht eingegangen zu werden. Bezüglich seiner Zugfestigkeit sei nur erwähnt, daß ein Muskel von 1 qcm Querschnitt einen Zug von 3 bis 5 kg aushalten kann, ohne zu zerreißen. Demgegenüber hat ein Stahldraht von 1 qcm Querschnitt eine Zugfestigkeit von etwa 7000 kg.

Mit den genannten mechanischen Eigenschaften hängt eng zusammen die wichtige und vielerörterte Frage nach dem Aggregatzustand der kontraktilen Substanz des Muskels.

Unter der „kontraktilen Substanz" des Muskels verstehen viele Autoren allein die Fibrillen, was aber schon der Ausdruck einer bestimmten Theorie ist. Wir wollen vorläufig Sarkoplasma und Fibrillen unter dieser Bezeichnung zusammenfassen, während die Zellkerne der Muskelfaser davon auszuschließen sind. Wir haben demnach einerseits nach dem Aggregatzustand der Fibrillen andererseits nach dem des Sarkoplasmas zu fragen.

Bezüglich der Fibrillen hat man früher gewöhnlich die Frage so gestellt: ob sie „fest" oder „flüssig" seien. Die neueren physikalischen Anschauungen über die Aggregatzustände lassen aber eine solche Fragestellung nicht mehr zu, da ein durchgreifender Unterschied zwischen „flüssig" und „fest" (im üblichen Sinne) weder theoretisch noch praktisch angegeben werden kann. Wir wollen auf diese Schwierigkeiten, die gerade im Bereiche der für uns hier in Betracht kommenden Aggregatzustände besonders groß sind, nicht näher eingehen, und das Problem in einer für unsere Zwecke, wie mir scheint, ausreichenden Weise folgendermaßen formulieren: Sind zwischen den Teilchen (Molekülen und Molekülkomplexen) der Fibrillen solche elastischen Kräfte vorhanden, welche die Teilchen derart aneinander fesseln, daß sie nicht mehr durch Oberflächenkräfte (Oberflächenspannung, Adhäsion) auseinander gerissen und aneinander verschoben werden können? Wie wir nämlich bei den Theorien der Muskelbewegung sehen werden, wäre es sehr wichtig zu wissen, ob die Fibrillen durch Oberflächenkräfte deformiert, im besonderen verkürzt oder verlängert werden können oder nicht.

Da wir bei der Protoplasmabewegung ebenfalls dem Problem der Deformierbarkeit durch Oberflächenkräfte wieder begegnen, so möge gleich hier das Erforderliche dargelegt werden. Zur Erläuterung diene folgender einfacher Versuch: Man denke sich auf einer Glasplatte einen Wassertropfen, der sich infolge von Schwere und Adhäsion in bestimmter Weise abplattet. Bringt man den Tropfen auf eine fettige Unterlage, so kugelt er sich mehr ab als vorher, da seine Adhäsion an Glas größer ist als an Fett oder, was dasselbe bedeutet, da seine Oberflächenspannung gegen Glas geringer ist als gegen Fett. Wenn man ferner die Oberfläche des Tropfens mit einem reinen Glasstab berührt, so wird er in bekannter Weise deformiert und kann beispielsweise zu einem kürzeren oder längeren zylinderähnlichen Gebilde ausgezogen werden. Diese Deformationen sind dadurch möglich, daß das Wasser sich eine Strecke weit an dem Glasstab ausbreitet, indem seine Oberflächenspannung gegen ihn geringer ist als an seiner Grenzfläche gegen die Luft. Hierzu sei noch ganz allgemein bemerkt, daß die Oberflächenkräfte, die für die äußere Form und die Formänderungen vieler Körper so wichtig sind (das gilt besonders für die gewöhnlich als „Flüssigkeiten" bezeich-

neten[1])), ebenso wie durch die Natur des angrenzenden Mediums, so auch durch chemische und physikalische Aenderungen der Oberfläche des Körpers selbst verändert werden können.

Es leuchtet ein, daß die Ermittlung des Aggregatzustandes der Fibrillen äußerst schwierig ist, da sie durch ihre Einhüllung in Sarkoplasma und Sarkolemm sich der direkten Untersuchung entziehen und nicht ohne tiefgreifende Aenderungen aus diesen Hüllen befreit werden können. Daher läßt sich in dieser Sache vorläufig nichts Bestimmtes sagen. Der hierüber aufgestellten Hypothesen wird erst bei den Erklärungsversuchen der Muskelbewegung gedacht werden.

Dem Sarkoplasma wird von den meisten Autoren ein „flüssiger" Aggregatzustand zugesprochen, was in diesem Falle gleichbedeutend ist mit der Fähigkeit, durch Oberflächenkräfte deformiert zu werden.

Von physikalisch-energetischen Erscheinungen des ruhenden Muskels ist ferner noch zu erwähnen, daß er stets Wärme produziert und unter bestimmten Bedingungen auch elektrische Energie liefert („Demarkationsstrom").

Diese beiden Energien stammen aus der chemischen Energie des Muskels.

bb) Erscheinungen des erregten, tätigen, sich bewegenden Muskels. Die unter Bewegungserscheinungen verlaufende Erregung oder Tätigkeit des Muskels tritt normalerweise dann ein, wenn ihm vom Zentralnervensystem aus durch seinen motorischen Nerven ein Reiz zugeleitet wird (über „Reiz" und „Reizbarkeit", d. h. die Fähigkeit, auf Reize zu reagieren usw., vgl. den Art. „Leben"). Doch kann auch dem vom Körper losgelösten Muskel auf künstlichem Wege entweder indirekt durch Einwirkung auf seinen Nerven oder direkt ein Reiz zugeführt und der Muskel so in Bewegung versetzt werden (vgl. den Artikel „Leben").

Die Bewegung des Muskels zeigt einen recht verschiedenen Verlauf je nach dem zeitlichen Verlauf des Reizes. Danach sind vornehmlich zwei Haupttypen von Bewegungen zu unterscheiden, zwischen denen zahlreiche Uebergänge bestehen: nämlich die „Zuckung" und der „Tetanus". Wir wollen uns hier im wesentlichen auf die einfachste Form, d. h. die Zuckung, beschränken, die bei einem einmaligen kurzdauernden Reiz, z. B. bei Einwirkung eines Induktionsstroms auf den Muskel oder seinen Nerven, eintritt.

Die Zuckung besteht in einer kurzdauernden (0,003 bis ca. 0,5 Sekunden dauernden) Bewegung, wobei sich der Muskel in der Längsrichtung seiner Fasern verkürzt, in ihrer Querrichtung verdickt und kurz darauf wieder seine ursprüngliche Form annimmt. Man kann diesen ganzen Bewegungsvorgang in drei Abschnitte zerlegen, nämlich 1. den Vorgang der Verkürzung oder Kontraktion, von dem der ganze Vorgang die Bezeichnung Kontraktionsbewegung erhalten hat, 2. den Zustand der Verkürzung oder des Verkürztseins und 3. den Vorgang der Erschlaffung, Wiederverlängerung oder Expansion. Ebenso wie die Kontraktion ist auch die Expansion ein aktiver Vorgang, was einerseits aus den morphologischen Aenderungen der Muskelfibrillen bei der Expansion (siehe später S. 1061), andererseits aus der Tatsache folgt, daß auch horizontalliegende Muskeln, an denen keinerlei Zug ausgeübt wird, ja selbst isolierte Muskelfasern sich nach ihrer Verkürzung wieder von selbst verlängern (vgl. z. B. K. Hürthle, Ueber die Struktur der quergestreiften Muskelfasern von Hydrophilus. Pflügers Archiv Bd. 126 S. 43ff. 1909). Betrachten wir nun die Erscheinungen des erregten, sich bewegenden Muskels etwas näher.

αα) Morphologische Erscheinungen. Die Verkürzung und Verdickung des Muskels bei der Kontraktion beruht in letzter Instanz auf einer Verkürzung und Verdickung der einzelnen Fibrillen. Dabei zeigen dann die verschiedenen Schichten der letzteren ganz bestimmte Aenderungen. Die anisotropen Schichten werden etwa in demselben Maße niedriger wie sie breiter werden, sie ändern also ihr Volum nicht merklich. Dagegen werden die isotropen Schichten breiter ohne niedriger zu werden, nehmen also an Volum zu. Gleichzeitig büßt das Sarkoplasma zwischen den Fibrillen an Volum ein. Man kann daher wohl sagen, daß bei der Kontraktion die isotrope Substanz auf Kosten von Bestandteilen des Sarkoplasmas ihr Volum vergrößert. Ferner treten im optischen Verhalten der Schichten der Fibrillen bestimmte Aenderungen auf, zwar nicht für die Beobachtung im polarisierten, wohl aber im natürlichen Licht: Mit zunehmender Kontraktion werden nämlich die anisotropen Schichten zunehmend heller und schwächer lichtbrechend, während die isotropen Schichten dunkler und stärker lichtbrechend werden; auf dem Höhepunkt der Kontraktion ist daher jetzt, umgekehrt wie in der Ruhe, das anisotrope Band das helle und das isotrope das dunkle. Das Sarkoplasma erscheint auch jetzt, wie immer, am hellsten (über alle diese Erscheinungen siehe z. B. L. Szymo-

[1]) Doch sei erwähnt, daß dies auch für manche „feste" Körper gilt und daß der moderne Physiker wohl auch von „Flüssigkeiten" spricht (im Sinne von „amorphen Körpern"), die durch Oberflächenkräfte nicht deformierbar sind.

nowicz und R. Krause, Lehrbuch der Histologie 2. Aufl. Würzburg 1909; K. Hürthle, Ueber die Struktur der quergestreiften Muskelfasern von Hydrophilus. Pflügers Archiv Bd. 126 S. 1 1909. Die Darstellungen in Lehrbüchern weichen noch häufig von diesen neueren Angaben ab).

Ferner sind noch einige weitere Aenderungen des Muskelfaserinhalts bei der Kontraktion zu erwähnen: Der Zusammenhang zwischen Sarkoplasma und Fibrillen wird inniger als zuvor, was daraus hervorgeht, daß die Längsstreifung der Faser im allgemeinen verschwommener wird und daß die Fibrillen jetzt schwieriger durch Zerzupfen voneinander zu isolieren sind. Ferner hat man beobachtet, daß die Sarkosomen bei der Kontraktion ihre Färbbarkeit ändern.

Die geschilderten Aenderungen der Muskelfaser beginnen mit dem Vorgang der Kontraktion, erreichen im Zustand des Verkürztseins ihren Höhepunkt und gehen bei der Expansion wieder vollständig zurück. Nie befinden sich gleichzeitig alle Teile der Muskelfaser im gleichen Tätigkeitsstadium; denn die Erregung und Kontraktion beginnt an der Stelle, wo der Faser der Reiz zugeführt wird, und breitet sich von hier aus in Form einer „Welle" über die ganze Faser aus. Diese „Fortpflanzung" oder „Leitung" der Erregung und Kontraktion geschieht bei verschiedenen Muskeln mit sehr verschiedener Geschwindigkeit (3 bis 6 m in 1 Sekunde).

$\beta\beta$) Chemische Erscheinungen. Ganz allgemein finden wir bei der Erregung und Bewegung eines Muskels eine Steigerung seines Stoffwechsels gegenüber der „Ruhe". Diese ist freilich erst bei etwas ausgiebigerer Tätigkeit tatsächlich festzustellen, woraus man aber mit Sicherheit auch einen entsprechenden Schluß auf die einzelne Zuckung ziehen kann.

So zeigt sich bei der Erregung einerseits ein vermehrter Verbrauch von Nahrungsstoffen, und zwar betrifft dieser in besonders auffälliger Weise das in den Muskelfasern angehäufte Glykogen und den im Blute kreisenden Sauerstoff; andererseits beobachtet man eine gesteigerte Erzeugung von Stoffwechselprodukten, besonders von Kohlensäure, Milchsäure usw.

Einen Hinweis auf diese Steigerung des Stoffwechsels enthält schon die Tatsache, daß bei der Tätigkeit des Muskels seine Blutversorgung vermehrt ist.

$\gamma\gamma$) Energetische Erscheinungen. Hier sind für uns wieder die mechanischen Erscheinungen in erster Linie von Interesse. Sie sind schon in den oben geschilderten bei der Erregung auftretenden morphologischen Erscheinungen angedeutet. Aus diesen geht hervor, daß bei der Kontraktion eine Massenverschiebung von Teilchen der Fibrillen und des Sarkoplasmas stattfindet, wodurch die Fibrillen kürzer und breiter werden, die isotrope Substanz an Volum zu- und das Sarkoplasma an Volum abnimmt. Das heißt mit anderen Worten: es wird Bewegungsenergie frei, die in positive Arbeit oder andere Energieformen umgewandelt werden kann. Von der Verwendung der erzeugten Bewegungsenergie für verschiedene Leistungen des Organismus war schon früher die Rede (S. 1036). 1057

Die Kraft- und Arbeitsleistung, die ein Muskel bei der Kontraktion vollbringen kann, sind recht beträchtlich. Ein Froschmuskel führt bei einer Zuckung seine Verkürzung mit solcher Kraft aus, daß ein Muskel von ½ qcm Querschnitt dabei etwa ½ kg noch eben zu heben vermag[1]). Warmblütermuskeln einschließlich derer des Menschen leisten etwa das Doppelte. Die Größe der Muskelkraft läßt sich am besten veranschaulichen, wenn man an einen frei herabhängenden isolierten Muskel ein Gewicht anhängt, das er bei der Kontraktion der Erdschwere entgegen zu heben sucht. In derselben Weise kann man auch die Größe der positiven Arbeit (Zugarbeit) ermitteln, die der Muskel bei einer Zuckung etwa zu liefern vermag. Zu diesem Zwecke muß man außer dem gehobenen Gewicht auch noch die Strecke kennen, um die das Gewicht gehoben worden ist, d. h. mit anderen Worten die Verkürzungsgröße des Muskels. Man kann etwa sagen, daß ein Froschmuskel von 4 cm Länge und ½ qcm Querschnitt ein Gewicht von 250 g ungefähr 1 cm hoch hebt; das bedeutet also eine Arbeitsleistung von $1 \times 250 = 250$ gcm (Grammzentimeter).

Zu den energetischen Erscheinungen des sich bewegenden Muskels gehört auch die wichtige Tatsache, daß die besprochene mechanische Energie in irgendeiner noch nicht näher bekannten Weise aus der chemischen Energie der kontraktilen Substanz entspringt (siehe unter β S. 1062 ff.). Das erhellt besonders aus den obengenannten chemischen Aenderungen, die bei der Erregung festzustellen sind.

Mit der Verwandlung von chemischer Energie in mechanische sind aber die Energieänderungen bei der Erregung keineswegs erschöpft. Vielmehr tritt stets auch Wärme und elektrische Energie auf, die ebenfalls aus der chemischen Energie der kontraktilen Substanz hervorgehen. Und zwar ist es gerade die Wärme, in die der weitaus größte Teil der gesammten bei einer Zuckung umgesetzten

[1]) Gewöhnlich berechnet man die Kraft auf 1 qcm Querschnitt des Muskels, wofür sich wegen der Proportionalität zwischen Querschnitt und Muskelkraft das Doppelte des obigen Wertes ergibt.

chemischen Energie, nämlich etwa 75% derselben, verwandelt wird; die übrigen 25% gehen im wesentlichen in mechanische Energie über und nur ein sehr kleiner Teil in elektrische. Da bei allen Kraftmaschinen (Dampfmaschine usw.) ein erheblich geringerer Teil der gesamten chemischen Betriebsenergie in mechanische Energie umgesetzt werden kann, ist der „Nutzeffekt" oder „Wirkungsgrad" der „Muskelmaschine" ein besonders hoher.

Es sei noch erwähnt, daß dann, wenn ein Muskel bei der Erregung gar keine bleibende positive Arbeit leistet, seine gesamte umgesetzte chemische Energie zu Wärme wird.

β) Theorien der Muskelbewegung und ihre Kritik. Von Theorien und Ansätzen zu solchen gibt es eine erhebliche Menge, die hauptsächlich in zweierlei Hinsicht voneinander verschieden sind: einerseits bezüglich der Voraussetzungen über die Natur des chemischen Aufbaues der lebendigen Muskelsubstanz und der chemischen Prozesse bei der Muskelerregung, andererseits hinsichtlich der Annahmen über den Aggregatzustand der Fibrillen und die Art der Energieverwandlungen, die zur Bewegung des Muskels führen.

Für die Frage des chemischen Aufbaues der lebendigen Muskelsubstanz und ihrer Prozesse in der Ruhe und bei physiologischen Schwankungen, im besonderen bei der Erregung, gilt das in Artikel „Leben" S. 72ff. Ausgeführte. Dort ist angegeben, daß man im allgemeinen zwei Gruppen von Hypothesen unterscheiden kann, die „Maschinenhypothesen" und die „Selbstzersetzungshypothesen".

Was zunächst den Aggregatzustand der Muskelfibrillen anbetrifft, so finden wir alle möglichen Ansichten vertreten, nämlich daß er ein „fester" sei, daß er ein „flüssiger" sei und daß er an der Grenze von beiden liege, d. h. etwa gallertig oder dgl. sei.

Die Vertreter des „festen" Zustandes betonen besonders, daß die Fibrillen eine feste „Struktur" hätten, indem ihre Teilchen in der Längs- und Querrichtung in bestimmter Weise orientiert seien, wodurch Dislokationen derselben nur innerhalb bestimmter Richtungen und enger Grenzen möglich seien. Zugunsten einer derartigen Anschauung, für die man besonders die Doppelbrechung der Fibrillen herangezogen hat, äußert Biedermann im Anschluß an Apathy (vgl. W. Biedermann. In Ergebnisse der Physiologie, Bd. 8, S. 161, 1909) den sehr beachtenswerten Gedanken, daß man die Fibrillen des Muskels nicht dem undifferenzierten „flüssigen" Protoplasma gleichsetzen dürfe, sondern als „Plasmaprodukte" ansehen müsse, die hinsichtlich des Aggregatzustandes den Bindegewebsfibrillen, elastischen Fasern usw. näher ständen als der protoplasmatischen Grundmasse.

Demgegenüber betonen die Vertreter des „flüssigen" Zustandes der Fibrillen (oder mit anderen Worten ihrer Deformierbarkeit durch Oberflächenkräfte, vgl. S. 1059), daß ihr Aggregatzustand dem des amöboiden, rhizopodoiden, „strömenden" Protoplasmas im wesentlichen gleich sei (auf die nur noch ganz vereinzelt festgehaltene Auffassung, daß auch das letztgenannte Protoplasma „fest" sei — vgl. z. B. M. Heidenhain Sitzungsberichte d. med.-physik. Ges. Würzburg, 1897 und a. a. O. — braucht hier nicht eingegangen zu werden). Bei dieser Gleichsetzung bereitete aber die große Zugfestigkeit des Muskels (vgl. S. 1061), die mit einer „Flüssigkeit" kaum vereinbar schien, besondere Schwierigkeiten. Diese sind indessen von Jensen sehr vermindert worden durch den Hinweis, daß die Oberflächenschichten aller Flüssigkeiten eine sehr große Zugfestigkeit haben im Vergleich zu der ganzen Flüssigkeitsmasse, daß ferner die Muskelfibrillen wegen ihrer geringen Dicke ganz vorwiegend aus Oberflächenschicht bestehen und daher trotz „flüssigem" Aggregatzustand eine große Zugfestigkeit haben könnten. Andere Bedenken, die sich an die geringe Stabilität „flüssiger" Fäden von der Länge und Dünne der Fibrillen knüpfen, ließen sich wohl am besten durch die Annahme eines wabigen Baues der letzteren beseitigen, der wohl von einigen Autoren behauptet worden ist, ohne daß sich hierüber etwas Bestimmtes hat nachweisen lassen (über die mechanischen Eigenschaften wabig angeordneter Flüssigkeiten siehe L. Rhumbler Zeitschr. f. allgemeine Physiologie, Bd. 1, S. 279, 1902).

Von Energieverwandlungen ferner, die zur Entstehung der Bewegungsenergie des erregten Muskels führen sollen, sind hauptsächlich die folgenden angenommen worden:

1. Direkte Verwandlung von chemischer Energie in Bewegungsenergie (Pflüger, A. Fick, Schenck u. A.); danach wäre der Muskel eine „chemodynamische Maschine".

2. Chemische Energie — Oberflächenenergie — Bewegungsenergie (Imbert, Verworn, Jensen, Bernstein u. A.); das ist die Oberflächenspannungstheorie.

3. Chemische Energie — Thermische Energie — Quellungsenergie — Bewegungsenergie (Engelmann); dementsprechend hat man den Muskel als „thermodynamische Maschine" bezeichnet.

4. Chemische Energie — Quellungsenergie — Bewegungsenergie (von Engelmann und Biedermann behandelt); das ist das Wesentliche der „chemodynamischen Quellungstheorie".

5. Chemische Energie — Osmotische Ener-

gie — Bewegungsenergie (McDougall, Meigs u. A.); daraus ergibt sich die „osmotische Theorie".

Ueber alle diese Anschauungen findet man Näheres nebst Literatur bei W. Biedermann, Vergleichende Physiologie der irritablen Substanzen. In Ergebnisse der Physiologie, Bd. 8, S. 26, 1909).

So ergibt sich aus Kombinationen der obengenannten verschiedenen Vorstellungen über den chemischen und physiologischen Aufbau der kontraktilen Substanz und über ihre chemischen Prozesse und Energieverwandlungen eine reichliche Anzahl mehr oder weniger durchgeführter Theorien der Muskelbewegung. Von all diesen soll hier nur eine Auswahl kurz skizziert werden, nämlich 1. die Theorie des „unmittelbaren Energieumsatzes", die den Muskel als chemodynamische Maschine auffaßt, 2. die Oberflächenspannungstheorie, 3. die thermodynamische Quellungstheorie und 4. die chemodynamische Quellungstheorie.

Für die Theorie des unmittelbaren Energieumsatzes, als deren Vertreter Pflüger, A. Fick und Schenck genannt seien, ist die Annahme charakteristisch, daß die mechanischen Zugkräfte, die der Muskel bei der Kontraktion erzeugt, identisch seien mit den chemischen Affinitäten gewisser bei der Erregung umgesetzter Bestandteile der Fibrillen; daß demnach die chemische Energie dieser Teile unmittelbar in Bewegungsenergie übergehe. Die Voraussetzungen über den Aggregatzustand der kontraktilen Substanz sind derart, daß neben einem „flüssigen" Sarkoplasma „feste" Fibrillen von der S. 1062 charakterisierten Art angenommen werden.

Die Oberflächenspannungstheorie, deren es verschiedene Formen gibt (nämlich die von Imbert, Verworn, Jensen, Bernstein), sei in der von Jensen ausgearbeiteten hier wiedergegeben (siehe P. Jensen in Pflügers Archiv f. d. gesamte Physiologie, Bd. 80, S. 220ff., 1900 und Bd. 83, S. 172, 1900; ferner Anatomische Hefte, Bd. 27, S. 843ff., 1905). Danach wird den Muskelfibrillen ebenso wie dem Sarkoplasma ein solcher Aggregatzustand zugeschrieben, daß sie durch Oberflächenkräfte leicht deformiert werden können. Ihre trotzdem vorhandene große Stabilität ließe sich durch die Annahme einer Wabenstruktur verständlich machen, wie schon S. 1062 bemerkt. Die bedeutende Zugfestigkeit erhalten die Fibrillen durch das starke Hervortreten ihrer Oberflächenschichten (vgl. S. 1062). Sie sind der Sitz der Oberflächenspannung, die zwischen Fibrillen und Sarkoplasma besteht und den Fibrillen oder ihren einzelnen Schichten das Bestreben verleiht, die geringste Oberfläche anzunehmen. Dieses Bestreben ist schon im ruhenden Muskel vorhanden; hier wird der verkürzenden Kraft der Oberflächenspannung durch die elastischen Kräfte der bindegewebigen Teile des Muskels, etwaige Belastungen usw. das Gleichgewicht gehalten. Durch das Zusammenwirken aller dieser Kräfte (mit Einschluß der Oberflächenspannung) erhält der Muskel seine bestimmte Länge im Ruhezustand.

Wenn nun eine Muskelfaser von einem Reiz getroffen wird, so breitet sich nach ziemlich allgemeiner Annahme die Erregung zunächst durch das Sarkoplasma aus und von dort wird sie weiter auf die Fibrillen übergeleitet. Dabei kommen dann die chemischen Wechselwirkungen zwischen Sarkoplasma und Fibrillen zustande, die einerseits in der Volumzunahme der isotropen Schichten auf Kosten des Sarkoplasmas und in den Aenderungen des optischen Verhaltens der isotropen und anisotropen Schichten zum Ausdruck gelangen. Andererseits führen diese chemischen Aenderungen von Sarkoplasma und Fibrillen nach der vorliegenden Theorie zu einer Erhöhung der Oberflächenspannung ihrer Grenzschichten. Auch von der Art und Weise, wie das etwa geschehen könnte, ließe sich eine Vorstellung gewinnen (vgl. P. Jensen in Pflügers Archiv, Bd. 86, S. 82, 1901). So käme die Verkürzung aller Fibrillen und damit des ganzen Muskels zustande, indem jetzt das statische Gleichgewicht des vorher ruhenden Muskels gestört wird im Sinne eines Ueberwiegens der verkürzenden Kraft der Oberflächenspannung über die verlängernden Kräfte des Bindegewebes, von Belastungen usw. Nach ungefähren Berechnungen von Jensen, die später etwas genauer auch von Bernstein ausgeführt worden sind, würden die Oberflächenkräfte der gesamten Fibrillen eines Muskels annähernd ausreichen, um die erhebliche Verkürzungskraft des Muskels zu erklären.

In entsprechender Weise läßt sich auch die Expansion des Muskels verständlich machen. Vermöge der Selbststeuerung des Stoffwechsels (vgl. den Artikel „Leben") folgt auf die verstärkte Dissimilierung eine verstärkte (kompensierende) Assimilierung usw. und mit diesen chemischen Aenderungen gehen Hand in Hand die für die Expansion charakteristischen energetischen und morphologischen Aenderungen, durch die der Muskel wieder in seinen Ruhezustand zurückgeführt wird.

Die thermodynamische Theorie von Engelmann nimmt einen ähnlichen Aggregatzustand von Sarkoplasma und Fibrillen an wie die Theorie des „unmittelbaren Energieumsatzes". Die „festen" Fibrillen sollen bei Temperaturerhöhung in bestimmter Weise quellen, indem die anisotropen Schichten aus den isotropen Wasser aufnehmen und

sich hierbei verkürzen und verdicken[1]), wie sich allgemein positiv-einachsige doppelbrechende Substanzen bei der Quellung in der Richtung der optischen Achse verkürzen. Diese Fähigkeit der anisotropen Substanz führt Engelmann auf ihre kleinsten Teilchen, die „Inotagmen", positiv-einachsige Kristalle, zurück. Zur Erzeugung der Temperaturerhöhung, welche die Quellung der anisotropen Schichten hervorruft, dient die Wärmeproduktion, die bei der Erregung des Muskels im Sarkoplasma stattfindet. Eine experimentelle Stütze sucht Engelmann seiner Theorie zu verleihen durch einen sehr hübschen Versuch über Kontraktionsbewegungen von Darmsaiten usw., die infolge von thermischer Quellung oder Entquellung bei Erhöhung oder Erniedrigung der Temperatur auftreten, mit einer der Muskelkontraktion gleichwertigen Energieentwicklung. „Thermodynamisch" wird diese Theorie genannt, weil nach ihr die Bewegungsenergie auf dem Umwege über Wärme aus der chemischen Energie entsteht.

Mit der Frage einer chemodynamischen Quellungstheorie hat sich ebenfalls Engelmann zuerst befaßt, hat sie aber gegen seine thermodynamische Theorie zurückgesetzt. Neuerdings hat sich besonders Biedermann zu ihren Gunsten ausgesprochen (Ergebnisse der Physiologie Bd. 8, S. 190ff., 1909). Sie stimmt mit der thermodynamischen Quellungstheorie in den meisten Punkten überein, doch läßt sie die Quellung statt durch Temperaturerhöhung durch bestimmte chemische Verbindungen, die bei der Erregung im Sarkoplasma entstehen, direkt hervorrufen („chemische Quellung"). Als analoger Prozeß ist hier wieder die mit starker Verkürzung und Kraftentwicklung verbundene Quellung von Darmsaiten usw. anzuführen, die bei Einwirkung sehr verdünnter Säuren und Alkalien stattfindet und beim Neutralisieren wieder zurückgeht. Beim Muskel hat man diese Rolle wohl hauptsächlich der Milchsäure zuzuschreiben versucht, deren Wirkungen durch ihre nachfolgende Oxydation zu Kohlensäure wieder zurückgehen solle; doch könnte man auch an andere intermediäre Stoffwechselprodukte denken.

Auf die „osmotische Kontraktionstheorie" (Mc Dougall, Meigs), deren Voraussetzungen besonders unsicher sind, sei nur hingewiesen.

Mit ein paar Worten sei an den ausführlicher behandelten Theorien Kritik geübt: Gegen die Theorie des „unmittelbaren Energieumsatzes" erheben sich zunächst schwere chemisch-physikalische Bedenken, deren Besprechung hier aber zu weit führen würde (vgl. Th. W. Engelmann, Ueber den Ursprung der Muskelkraft, 2. Aufl., Leipzig 1893 und P. Jensen in Pflügers Archiv, Bd. 80, S. 204ff., 1900 und Bd. 83, S. 176ff. 1900). Ferner ist ein wichtiger von Engelmann formulierter Einwand zu erwähnen: Nach ungefährer Berechnung wird von der ganzen Masse einer Muskelfaser bei jeder Zuckung stets nur etwa $\frac{1}{4000000}$ dissimilatorisch gespalten und für die Energieleistung verwertet. Die vorliegende Theorie setzt aber notwendig die Beteiligung einer viel größeren Menge von Bestandteilen der kontraktilen Substanz an der chemischen Umsetzung voraus.

An der „Oberflächenspannungstheorie" ist die Frage des Aggregatzustandes noch nicht als befriedigend gelöst anzusehen und bietet wohl wenig Hoffnung auf eine einwandsfreie Lösung. Auch wird diese Theorie in gewissem Maße von dem Engelmannschen Einwande gegen die Annahme eines „unmittelbaren Energieumsatzes" getroffen, da nach ihr die ganze Masse von Sarkoplasma und Fibrillen in Erregung versetzt werden soll, was ebenfalls eine Beteiligung von erheblich mehr als nur $\frac{1}{4000000}$ der Masse voraussetzt.

Gegenüber der „thermodynamischen Quellungstheorie" hat man vor allem geltend zu machen, daß nach ihr im Beginn jeder Kontraktion eines Muskels eine viel größere Temperaturdifferenz zwischen Sarkoplasma und Fibrillen bestehen müßte, als in Wirklichkeit angenommen werden kann; bei dem höchstwahrscheinlich vorhandenen geringen Temperaturgefälle läßt sich nach dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik ein Nutzeffekt von 20% und mehr (vgl. S. 1062) nicht erwarten. Ferner hat man darin wohl eine Schwierigkeit der Theorie gefunden, daß sie für die Muskelbewegung ein anderes Erklärungsprinzip verwende als für die anderen Kontraktionsbewegungen, nämlich die Protoplasma- und Flimmerbewegung, für welche die weitaus meisten Autoren die Oberflächenspannungstheorie anerkennen (siehe S. 1070). Ob wir aber berechtigt sind, für alle Kontraktionsbewegungen das gleiche Erklärungsprinzip zu fordern, das ist die Frage. Man kann vielleicht mit nicht geringerem Recht die Ansicht vertreten, daß zugleich mit dem Auftreten der morphologisch eigenartigen Fibrillen und der Einengung der Kontraktionsbewegung in ganz bestimmte Bahnen auch ein anderes Bewegungsprinzip verwirklicht werde als das der Bewegung des „strömenden" Protoplasmas zugrunde liegende.

[1]) Nach den neueren Untersuchungen findet freilich, wie oben S. 1060 angegeben wurde, eine Quellung der anisotropen Schichten auf Kosten der isotropen nicht statt.

Will man dem eben Gesagten beipflichten, so wird man zurzeit wohl an der chemodynamischen Quellungstheorie am wenigsten auszusetzen haben. Freilich ist diese noch sehr wenig entwickelt und man kann daher nicht wissen, ob bei ihrer weiteren Ausarbeitung sich nicht noch unerwartete Schwierigkeiten herausstellen.

b) Andere Formen von Muskeln. Von solchen sind zu nennen: Schräggestreifte Muskeln, Herzmuskeln, glatte Muskeln, Myoide, Myoneme, Epithelmuskelzellen. Am nächsten stehen den quergestreiften Muskeln die schräggestreiften, die sich von jenen nur durch die schräg statt senkrecht zur Längsachse der Muskelfaser verlaufende Streifung unterscheiden. Erheblich verschiedener sind schon die Herzmuskelfasern; sie zeigen zwar auch Quer- und Längsstreifung, doch sind die den Muskelfasern entsprechenden Gebilde viel kleiner, im allgemeinen einkernig und miteinander anastomosierend. Die „glatten" (oder „längsgestreiften") Muskeln ferner bestehen aus einzelnen einkernigen, gewöhnlich spindelförmigen Zellen, die ebenfalls bedeutend kleiner sind als die quergestreiften Muskelfasern: sie enthalten zahlreiche in ihrer Längsrichtung verlaufende feine Fibrillen, die gewöhnlich ganz homogen sind. Noch weiter entfernen sich von den Skelettmuskeln die Myoide und Myoneme der Infusorien und anderer Zellen, homogene kontraktile Fibrillen oder Fibrillenbündel, die in sehr verschiedener Weise in das Protoplasma der betreffenden Zellen eingebettet sind. Die Epithelmuskelzellen der Cölenteraten und anderer Wirbelloser endlich sind die primitivsten muskelähnlichen Gebilde, die, wie ihr Name sagt, einen Uebergang zu den Epithelzellen darstellen. Die Kontraktionsbewegungen aller dieser Gebilde zeigen hinsichtlich ihrer Entstehungsbedingungen und ihres zeitlichen Ablaufes mancherlei Verschiedenheiten. Was ihre Erklärung anbetrifft, so dürfte sie bei den meisten von ihnen vielleicht am besten auf dem Wege der chemodynamischen Quellungstheorie zu erreichen sein.

II. Protoplasmabewegung. Es gibt so verschiedene Formen der Protoplasmabewegung, daß man zu einer recht inhaltsleeren Definition kommt, wenn man sie alle mit dieser umfassen will. Man wird sie dann etwa als eine Kontraktionsbewegung definieren, bei der die Massenverschiebungen nicht wie beim Muskel ganz stereotyp stets in derselben Richtung und in wenig variabler Größe erfolgen, sondern wo vielmehr äußerst mannigfaltige, sehr verschieden weitgehende und zu immer neuen Formen führende Gestaltänderungen der betreffenden Plasmakörper auftreten. Eine etwas inhaltreichere und daher anschaulichere allgemeine Charakteristik läßt sich nur dann geben, wenn man nur an die Mehrzahl der bekanntesten Repräsentanten der tierischen Protoplasmabewegung denkt und von einer besonderen Art, nämlich der Zirkulations- und Rotationsbewegung gewisser Pflanzenzellen absieht: Dann kann man sagen, daß der mehr oder minder kugel- oder scheibenförmige Plasmakörper, der die Protoplasmabewegung zeigt, hierbei seine äußere Form und die Anordnung seiner Inhaltsbestandteile in mannigfachster Weise verändert, indem er wechselnde Teile seines Protoplasmas zu in Größe und Form sehr variablen Fortsätzen, den „Pseudopodien", formt, die andauernde Bewegungen ihrer Massen zeigen und gewöhnlich zu Ortsveränderungen des ganzen Systems führen.

Die Protoplasmabewegung finden wir, in ihren verschiedenen Formen, bei einer großen Anzahl von lebendigen Systemen. Hierher gehören in erster Linie die Sarkodinen, die man in Rhizopoden s. str., Heliozoen, Radiolarien und Myxomyceten einteilen kann; ferner sind zu nennen die amöboiden Eizellen und Ento-, Meso- und Ektodermzellen vieler niederen Metazoen, die Leukocyten und Lymphocyten, manche Pigment- und Darmepithelzellen auch von höheren Tieren und endlich gewisse Zellen höherer Pflanzen (z. B. die Blattzellen von Vallisneria und die Haarzellen von Tradescantia) und verschiedene Infusorien. Von den Zellen mit ausgesprochener Protoplasmabewegung, die wir als „rhizopodoide" Zellen oder Plasmakörper zusammenfassen wollen, gibt es Uebergänge zu solchen mit nicht mehr wahrnehmbar aktiv bewegtem Protoplasma. Ferner gibt es Uebergänge resp. Kombinationen von Protoplasmabewegung mit Flimmer- und Muskelbewegung.

Die angedeuteten Unterschiede, welche die Protoplasmabewegung bei verschiedenen Objekten zeigt, haben zur Aufstellung mehrerer Typen geführt, deren man etwa folgende vier angeben kann: 1. Amöboide Bewegung oder Bewegung der „Lobosa", 2. Bewegung der „Filosa", 3. Bewegung der „Reticulosa" und 4. Zirkulations- und Rotationsbewegung. Diese verschiedenen Typen werden nachher näher charakterisiert werden.

Hier sei sogleich noch auf eine besondere Eigentümlichkeit der Protoplasmabewegung hingewiesen, die einen wichtigen Unterschied von der Muskelbewegung ausmacht. Es besteht nämlich bei der Protoplasmabewegung kein so prägnanter Unterschied zwischen „Ruhe" und „Erregung", indem z. B. eine Amöbe auch schon unter solchen Bedingungen Protoplasmabewegung zeigt, wo keine „äußeren Reize" (vgl. den Artikel „Leben"), wie sie zur Erregung des

Muskels erforderlich sind, existieren; wir sprechen dann von „spontanen" Bewegungen im Gegensatz zu den „Reizbewegungen".

Wir wollen die Protoplasmabewegung in analoger Weise behandeln wie die Muskelbewegung.

a) Tatsächliche Erscheinungen. Entsprechend der Gegenüberstellung von „Ruhe" und „Erregung" des Muskels wollen wir hier einerseits die Erscheinungen besprechen, die das rhizopodoide Protoplasma beim Fehlen äußerer Reize zeigt, andererseits die Erscheinungen der Erregung. Freilich ist hier die getrennte Behandlung von morphologischen, chemischen und physikalisch-energetischen Erscheinungen nicht so gut durchzuführen wie beim Muskel, da ganz vorwiegend nur die morphologischen Erscheinungen besser bekannt sind. Ueber etwaige psychische Erscheinungen sollen erst bei der Theorie der Protoplasmabewegung ein paar Worte bemerkt werden (S. 1071). Bei der Behandlung der morphologischen Erscheinungen wird auch der oben genannte Unterschied zwischen den „Lobosa", „Filosa" usw. (vgl. S. 1065) bezeichnet werden, da er im wesentlichen der morphologischen Untersuchung entnommen ist. Am ausführlichsten sollen die Bewegungen der „Lobosa" dargelegt werden, nächstdem die der „Filosa" und „Reticulosa"; dagegen werden die „Zirkulations"- und „Rotationsbewegungen" nur kurz besprochen werden, da diese am ausgeprägtesten im Pflanzenreich vorkommenden Erscheinungen in dem Artikel „Bewegungen der Pflanzen" besondere Berücksichtigung finden.

α) Erscheinungen beim Fehlen äußerer Reize. Hier sei zunächst noch einmal an die S. 1065 erwähnte wichtige Tatsache erinnert, daß diese Erscheinungen sich gegen die bei der Erregung auftretenden, d. h. also, daß die „Spontanbewegungen" sich gegen die „Reizbewegungen" im allgemeinen nicht scharf abgrenzen lassen.

aa) Morphologische Erscheinungen. Was zunächst die spontanen Bewegungen der „Lobosa" anbetrifft, so finden wir diese bei den meisten Amöben, bei Leukocyten, Lymphocyten und ähnlichen Zellen. Unserer ausführlicheren Schilderung der Lobosenbewegung wollen wir eine Amöbe, und zwar Amoeba limax, zugrunde legen. Es ist vorauszuschicken, daß diese membranlosen einzelligen Organismen einerseits ein ziemlich dünnflüssiges[1]) Entoplasma besitzen, das in seiner „Grundmasse" („Cytoplasma") viele Körnchen, den Zellkern und eine kontraktile Vakuole enthält, andererseits ein zäheres körnchenfreies („hyalines") Ektoplasma, das in der Regel nur aus homogener protoplasmatischer Grundmasse besteht. Die Bewegungen der Amöbe schildern wir am besten, indem wir von dem Zustande derselben ausgehen, den sie zeigt, wenn sie soeben mittels einer Pipette auf einen Objektträger unter das Mikroskop gebracht wurde. Wir sehen dann ein ziemlich kugelförmiges kleines Protoplasmaklümpchen, das alsbald seine Form zu ändern beginnt, indem an irgendeiner oder an mehreren Stellen ein stumpfer Fortsatz entsteht, der Beginn eines Pseudopodiums. Solche Pseudopodien sind anfangs ganz aus hyalinem körnchenfreiem Ektoplasma gebildet, erst wenn sie länger geworden sind, strömt auch das körnige Entoplasma ein wenig in sie hinein. Währenddessen plattet sich die Amöbe auch mehr oder minder ab.

Für die „Lobosa" ist charakteristisch, daß ihre Pseudopodien gewöhnlich ziemlich kurz und stumpf sind, bis gegen ihre Basis hin aus hyalinem körnchenfreiem Protoplasma bestehen und sich im allgemeinen in Berührung mit festen Unterlagen entwickeln. Bei der Amoeba limax bildet sich in der Regel nur ein einziges Pseudopodium aus, so daß der ganze Körper langgestreckt wird und sich in der Richtung seiner Längsachse fortbewegt. In demselben Maße, wie das Protoplasma nach vorn in das Pseudopodium hineinströmt, verkürzt sich das ebenfalls gestreckte, aber aus körnigem Protoplasma bestehende Hinterende des Tieres, indem von hier an das Entoplasma mit allen seinen Einschlüssen (Zellkern usw.) in dauernder Strömung nach vorn begriffen ist. Wir können hier in Beziehung auf den Mittelpunkt der Amöbe, in dem annähernd der Kern sich zu befinden pflegt, eine zweifache Bewegung des Protoplasmas feststellen: am Vorderpol eine „zentrifugale", am Hinterpol eine „zentripetale"; oder anders ausgedrückt: der Vorderteil zeigt „Expansion", der Hinterteil „Kontraktion". Im Gegensatz zu dem in Expansion befindlichen Pseudopodium an der Front läßt sich das hintere Ende der Amöbe als ein in Kontraktion befindliches Pseudopodium auffassen. Ganz allgemein kann man auch die zentrifugale Bewegung als „zylindrogen" bezeichnen, da sie dem Plasmakörper die Form eines abgeplatteten Zylinders (also eines Gebildes mit relativ großer Oberfläche) zu geben sucht, während die auf die Kugelform (also die kleinste Oberfläche) hinwirkende zentripetale Bewegung „sphärogen" zu nennen ist. Es leuchtet ein, daß beim Ueberwiegen der zylindrogenen Bewegung, wobei die Oberfläche der Amöbe im Verhältnis zu ihrer Innenmasse wächst, dies auf Kosten der letzteren geschieht. Hierbei findet eine Umwandlung des dünneren

[1]) Näheres über den Aggregatzustand siehe S. 1059.

Entoplasmas in das zähere Ektoplasma statt, während beim Vorherrschen der sphärogenen Bewegungskomponente das Umgekehrte der Fall ist. Diese Verwandlungen, die man nach Rhumbler kurz als „Ento-Ektoplasma-Prozeß“ bezeichnet, spielen bei der Bewegung der „Lobosa“ eine wichtige Rolle.

Wie schon erwähnt, kann die Amöbe auch eine größere Anzahl von Pseudopodien aufweisen, unter denen wir dann teils solche in Expansion, teils solche in Kontraktion antreffen. Sehr häufig sehen wir an demselben Pseudopodium gleichzeitig zylindrogene und sphärogene Bewegung. Man hat in dieser Hinsicht Pseudopodien resp. Amöben mit und ohne „rückläufige Randströmung“, von denen besonders die letzteren der Erklärung vorübergehend Schwierigkeiten bereitet haben (siehe hierüber L. Rhumbler, Zur Theorie der Oberflächenkräfte der Amöben, in Zeitschr. f. wissenschaftl. Zoolog. Bd. 83 S. 1 1905).

Das sind in Kürze die charakteristischen morphologischen Erscheinungen, die wir bei Lobosa, auf die keine äußeren Reize einwirken, beobachten können. Bezüglich einiger besonderer Eigentümlichkeiten der Myxomyceten, die man auch zu den „Lobosa“ rechnen kann, siehe den Artikel „Bewegungen der Pflanzen“.

Die Kontraktionserscheinungen der „Filosa“ sind denen der Lobosa ähnlich, nur sind bei ihnen die ganz hyalinen Pseudopodien im vollentwickelten Zustande lang, dünnzylinderförmig, meist mit spitzen Enden versehen und vielfach verzweigt, aber fast immer ohne Anastomosenbildung. Sie bilden sich anfangs ohne Berührung einer festen Unterlage und berühren diese erst später, wenn sie eine gewisse Länge erreicht haben. Wegen der großen Feinheit der in der Regel zahlreichen Pseudopodien ist das „Pseudopodiensystem“ gegen den übrigen ungefähr kugel- oder scheibenförmigen, meistens beschalten „zentralen Plasmakörper“ ziemlich scharf abgesetzt.

Die „Retikulosa“, zu denen als typische Vertreter die Foraminiferen gehören, sind hinsichtlich der Trennung von Pseudopodiensystem und zentralem Plasmakörper, ferner hinsichtlich der Dünne, Länge und der Verzweigungen der Pseudopodien den Filosa ähnlich. Zum Unterschiede aber bilden die Pseudopodien der Retikulosa häufig Anastomosen zwischen einander, so daß Netze entstehen, und ferner ist ihr Protoplasma stets körnchenhaltig und zeigt die eigenartige Erscheinung der „Körnchenströmung“. Auch sonst noch kommen Besonderheiten vor: Nicht selten erscheint die äußere Schicht der Pseudopodien dünnflüssiger als die innere und dann befinden sich die Körnchen nur in der Außenschicht. Diese größere Zähigkeit der Innenschicht kann soweit gehen, daß optisch scharf hervortretende und dauernd differenzierte scheinbar starre Gebilde, sogenannte Achsenstrahlen, auftreten (z. B. bei Actinosphaerium).

Für die Protoplasmaströmung auf den Pseudopodien ist es charakteristisch, daß sie durch die Bewegung der Körnchen, die häufig über die durchschnittlich zylinderförmige Oberfläche der Pseudopodien hinausragen, besonders augenfällig ist. Im allgemeinen kann man sagen, daß bei den in lebhafter Expansion begriffenen Pseudopodien ausschließlich zylindrogene Bewegung herrscht, daß ferner bei den ausgestreckt verharrenden Fortsätzen zylindrogene und sphärogene Strömung etwa gleichstark sind und daß endlich bei lebhafter Kontraktion ausschließlich sphärogene Bewegung vorhanden ist. Bei manchen Retikulosen werden die Bewegungserscheinungen dadurch recht kompliziert, daß die Körnchen nicht immer der Hauptströmung des Protoplasmas folgen und daß mitunter sphärogene und zylindrogene Bewegung fast in derselben Schicht des Pseudopodiums vorzukommen scheinen usw. (Näheres hierüber z. B. bei M. Schultze, Ueber den Organismus der Polythalamien, Leipzig 1854 und L. Rhumbler, Die Foraminiferen der Plankton-Expedition. Erster Teil, S. 255ff. Kiel 1911).

Die Zirkulations- und Rotationsbewegung endlich sind Bewegungsarten des Protoplasmas, die sich unabhängig von äußeren Formveränderungen der Plasmakörper in ihrem Innern abspielen. Sie kommen vorwiegend und am prägnantesten bei behäuteten Pflanzenzellen vor, ferner aber auch bei Sarkodinen und Infusorien. Von „Rotation“ spricht man, wenn Teile des Plasmakörpers sich stets im gleichen Sinne in einer in sich zurücklaufenden Bahn bewegen. Bei Pflanzenzellen, die diese Bewegung zeigen, rotiert so die der Zellhaut anliegende Plasmaschicht; bei Amöben tut dies unter Umständen die unter dem ruhenden Ektoplasma liegende äußerste Entoplasmaschicht. „Zirkulation“ ferner nennt man ganz allgemein die nach verschiedenen wechselnden Richtungen stattfindenden Strömungen im Inneren der Plasmakörper von Pflanzenzellen, Sarkodinen und Infusorien. Näheres über diese Bewegungserscheinungen findet man in dem Artikel „Bewegungen der Pflanzen“. Auf dort sei auch bezüglich der nur bei den Pflanzen vorkommenden „Gleit“- und „Glitsch-Bewegungen“ verwiesen.

bb) Chemische Erscheinungen. Hierüber sind unsere Kenntnisse noch sehr lückenhaft und unsicher. Es kann nur einiges Zusammenfassende über alle mit Protoplasma-

bewegung begabten lebendigen Systeme angegeben werden.

Die chemische Zusammensetzung der abgetöteten (vgl. den Artikel „Leben“) rhizopodoiden Systeme kennen wir in Umrissen nur aus der chemischen Analyse der Myxomyceten und der Eiterkörperchen, also der infolge von Bakterienwirkungen abgestorbenen Leukocyten. Danach ist der chemische Aufbau dieser Systeme und wohl auch der aller rhizopodoiden Organismen im wesentlichen dem der übrigen abgetöteten organismischen Systeme gleich. Ueber ihre etwaige chemische Beschaffenheit im Zustande des aktuellen Lebens siehe den Artikel „Leben“.

Ueber die chemischen Prozesse der lebendigen rhizopodoiden Systeme ferner ist etwa folgendes zu sagen: Aus der Tatsache, daß im allgemeinen Sauerstoff gebraucht wird, kann man auf das Vorhandensein von Oxydationsprozessen schließen. Ferner ist aus der Beschaffenheit der aufgenommenen Nahrung und ihren Veränderungen zu erkennen, daß ein Verbrauch von Proteinsubstanzen, Kohlehydraten usw., daß Verdauung und überhaupt ein Stoffwechsel ähnlich wie bei anderen lebendigen Systemen existiert. Auch gewisse Stoffwechselprodukte weisen in dieselbe Richtung. Wie schon angedeutet, steht die Protoplasmabewegung im Dienste des Stoffwechsels, indem sie die Aufnahme der Nahrung und Abgabe der Stoffwechselprodukte vermittelt.

cc) Physikalisch-energetische Erscheinungen. In erster Linie ist hier der Aggregatzustand des rhizopodoiden Protoplasmas für uns von Interesse, und zwar derjenige der Grundmasse einerseits des Entoplasmas andererseits des Ektoplasmas. Hierüber ist zu sagen, daß die überwiegende Mehrzahl der Biologen es als eine feststehende Tatsache betrachtet, daß mit Ausnahme einiger spezieller Bildungen (wie der Achsenstrahlen von Aktinosphaerium, etwaiger zeitweiliger lokaler Gelatinierungen oder dgl.) die ganze protoplasmatische Grundmasse der rhizopodoiden Plasmakörper „flüssig“ sei, d. h. leicht deformierbar durch Oberflächenkräfte (vgl. S. 1057). Diese Ansicht ist in neuerer Zeit besonders überzeugend durch die scharfsinnigen und vielseitigen experimentellen Untersuchungen von Rhumbler gefestigt worden (ausführliche kritische Behandlung dieses Gegenstandes nebst Literatur bei W. Biedermann a. a. O.) Oben wurde schon angegeben, daß die Grundmasse des Entoplasmas bei den Lobosa und Filosa mehr dünnflüssig, die des Ektoplasmas mehr zähflüssig ist, während bei den Retikulosa meistens das Umgekehrte zutrifft. Die Systeme mit Zirkulations- und Rotationsbewegung zeigen häufig dünnflüssigere und zähere Massen in komplizierterer Anordnung.

Von physikalisch-energetischen Prozessen sind zunächst die Aenderungen des Aggregatzustandes beim Ento-Ektoplasma-Prozeß zu nennen (vgl. S. 1067). Sodann sei darauf hingewiesen, daß durch die Produktion von Bewegungsenergie, die mit einer bestimmten Geschwindigkeit erfolgt (siehe hierüber P. Jensen, Die Protoplasmabewegung. In Ergebnisse der Physiologie, Jahrg. 1 S. 10ff. 1902) erhebliche Kraftleistungen zustande kommen können; z. B. vermögen die feinen Pseudopodien des retikulosen Foraminifers Orbitolites ihr verhältnismäßig großes und schweres Kalkgehäuse an senkrechten Wänden in die Höhe zu ziehen. Diese Erscheinung, die auf den ersten Blick einem „flüssigen“ Aggregatzustand zu widerstreiten scheint, ist in Anbetracht der großen Gesamtoberfläche der Pseudopodien mit dieser Annahme doch leicht vereinbar (vgl. S. 1062). Man kann auch die Arbeitsleistung angeben, die unter solchen Umständen in der Zeiteinheit verrichtet wird. Ferner läßt sich in manchen Fällen bei rhizopodoiden Plasmakörpern auch eine Produktion von elektrischer Energie nachweisen und eine geringe, freilich wohl kaum nachweisbare Wärmeerzeugung darf gewiß angenommen werden. Alle diese freiwerdenden Energiemengen entspringen jedenfalls zum größten Teil der beim Stoffwechsel umgesetzten chemischen Energie der betreffenden Plasmakörper.

Am Ende dieser Darstellung der Erscheinungen der Protoplasmabewegung beim Fehlen von Reizen sei in Kürze ihrer Abhängigkeit von einigen sonstigen wichtigen äußeren und inneren Bedingungen gedacht: Im allgemeinen nimmt mit steigender Temperatur bis zu einem gewissen Grade erst die zylindrogene, dann die sphärogene Bewegung in höherem Grade zu, ferner findet bei den meisten rhizopodoiden Plasmakörpern nur bei genügender Sauerstoffzufuhr eine zylindrogene Bewegung statt, diese kann außerdem durch Einwirkung von Nahrungskörpern gefördert werden usw. Schließlich sei noch darauf hingewiesen, daß auch Protoplasma, das von dem zellkernhaltigen Plasmakörper abgetrennt ist, noch längere oder kürzere Zeit die typischen Bewegungen zeigen kann, daß hierbei aber bald die sphärogene Bewegung mehr und mehr vorherrschend wird, bis das kernlose Protoplasma schließlich in völligem Kontraktionszustande abstirbt (vgl. M. Verworn, Allgemeine Physiologie. 5. Aufl. Jena 1909, S. 356f., 389f. und 626ff.).

β) Erscheinungen bei Einwirkung äußerer Reize. Unter diesen sind die Erscheinungen der „Erregung“ die weitaus

häufigsten und ökologisch wichtigsten. Doch ist hier, wie schon erwähnt, keine so scharfe Grenze zwischen „Ruhe“ und „Erregung“ zu ziehen, wie gewöhnlich beim Muskel. Das kommt nicht nur dadurch, daß auch schon in der „Ruhe“ Bewegungen vorhanden sind, sondern auch durch den Umstand, daß die Erregung mit der Reizstärke ganz allmählich bis zu den höchsten Graden anwächst, während beim Muskel solche stetige Uebergänge fehlen. Noch ein weiterer charakteristischer Unterschied zwischen dem Verhalten des rhizopodoiden Protoplasmas und des Muskels wie auch des Nerven sei hier sogleich hervorgehoben: Bei ersterem bleibt bei einem selbst ziemlich starken, lokal einwirkenden Reiz auch die Erregung mehr oder minder lokal beschränkt („partiell“), während sie beim Muskel und Nerven in der Regel das ganze System durcheilen. Nur wenn der gesamte rhizopodoide Plasmakörper vom Reiz getroffen wird, tritt eine „totale“ Erregung ein. Die im folgenden zu schildernden Erregungserscheinungen werden nahezu durch alle „allgemeinen Reize“ hervorgerufen (vgl. den Artikel „Leben“).

aa) Morphologische Erscheinungen. Die Erregung äußert sich stets in einer Verstärkung der sphärogenen Bewegungskomponente. Ein besonders einfaches und prägnantes Beispiel liefert uns die oben besprochene Amoeba limax, wenn sie, mit ausgestreckten Pseudopodien dahinkriechend, von einem stärkeren und nicht zu kurzdauernden Erschütterungsreiz getroffen wird. Wir sehen dann, daß sie alle Pseudopodien einzieht und Kugelform annimmt. Wird nur ein einzelnes Pseudopodium, etwa durch einen Stoß, gereizt, so verkürzt es sich je nach der Stärke des Reizes mehr oder weniger, während das übrige Tier nicht weiter reagiert; d. h. bei lokal beschränktem Reiz bleibt auch die Erregung au ein ziemlich enges Gebiet beschränkt.

Analoge Erscheinungen sind auch bei den Filosa und Retikulosa zu beobachten, wo ferner noch manche eigenartige Einzelheiten deutlicher hervortreten: Bei stärkerer Reizung durch Erschütterung, elektrische Ströme usw. wird die Protoplasmabewegung ausnahmslos sphärogen und es treten auf den betroffenen Pseudopodien kugel- und spindelförmige Anschwellungen auf, die mit dem allgemeinen sphärogenen Strom dem zentralen Protoplasmakörper zustreben. Geht bei sehr energischer Reizung die Ausbildung der kugelförmigen Anschwellungen der Pseudopodien sehr rasch und ausgiebig vor sich, so können die feinen Protoplasmabrücken zwischen den größeren Massenanhäufungen zerreißen und so ein Hineingelangen der auf diese Weise isolierten Protoplasmaklümpchen in den zentralen Plasmakörper verhindert werden. Der höchste Grad der Kontraktion besteht darin, daß unmittelbar nach Einwirkung des Reizes das betroffene Pseudopodium in eine regelmäßige Reihe ganz kleiner Kügelchen zerfällt; das kommt besonders bei chemischer Reizung, z. B. durch Sublimat, Osmiumsäure usw. vor.

Sobald ein Reiz zur Bildung spindelförmiger Anschwellungen der Pseudopodien geführt hat, wird noch eine Erscheinung deutlich, die für das erregte Protoplasma typisch ist: Es entstehen in der protoplasmatischen Grundmasse zahlreiche kleine Tröpfchen von einer scheinbar wässerigen Flüssigkeit, die dem Protoplasma eine „Schaum“- oder „Wabenstruktur“ verleihen, falls nicht schon vorher eine solche vorhanden war. Dieses Auftreten einer Wabenstruktur mit der Erregung ist besonders deutlich bei den vorher ganz hyalinen Pseudopodien der Filosa, läßt sich aber auch bei den Retikulosa leicht beobachten und unter günstigen Bedingungen auch bei den Lobosa.

Endlich sei als eine bisweilen bei der Erregung auftretende Erscheinung das Entstehen einer stärker lichtbrechenden, festeren Substanz in der Achse der Pseudopodien erwähnt, wie Verworn es bei Difflugia beobachtet hat. Ein ähnlicher „Kohäsionswechsel“ kann bei anderen Plasmakörpern auch an der Oberfläche auftreten.

bb) Chemische Erscheinungen. Ueber chemische Aenderungen des rhizopodoiden Protoplasmas bei der Erregung ist fast nichts Tatsächliches bekannt. Wir sind hier nahezu ganz auf Hypothesen angewiesen, die hauptsächlich aus der Untersuchung der Muskeln und anderer lebendiger Systeme gewonnen wurden, wovon später die Rede sein wird.

cc) Physikalisch-energetische Erscheinungen. Sie sind im wesentlichen schon in der Schilderung der morphologischen Aenderungen bei der Erregung enthalten. Wir haben es also mit einer mehr oder minder weitgehenden Zunahme der sphärogenen Massenverschiebung auf den Pseudopodien zu tun. Wie groß die hierbei entwickelte Kraft ist, wissen wir nicht. Auch über Wärme- und Elektrizitätsproduktion und den Zusammenhang der Energieverwandlungen bei der Erregung ist ebensowenig Tatsächliches bekannt wie über diese Verhältnisse bei nicht gereizten Plasmakörpern.

Von sekundären Wirkungen der Reize, die nicht alle hier behandelt werden können (vgl. hierüber P. Jensen, Die Protoplasmabewegung. In Ergebnisse der Physiologie Jahrg. 1, S. 10ff., 1902), sei nur auf die Nahrungsaufnahme und die Ausstoßung von unverdauten Nahrungsresten und Stoffwechselprodukten durch die Protoplasmabewegung hingewiesen und der schon oben erwähnten Ortsbewegung der ganzen Plas-

makörper gedacht. Eine solche findet statt, wenn auf der einen Seite eines rhizopodoiden Plasmakörpers die Kontraktion, auf der anderen die Expansion überwiegt. Das ist gewöhnlich der Fall bei einseitig wirkenden äußeren Reizen oder überhaupt, wenn sich der Plasmakörper an verschiedenen Seiten unter verschiedenen Bedingungen befindet. Wirken von einer Seite z. B. Gifte, stärkere mechanische Reize, hohe Temperatur usw. ein, welche die sphärogene Bewegungskomponente dieser Seite verstärken, so bewegt sich der Plasmakörper nach der anderen Seite; wir sprechen dann von einer „negativen Chemotaxis“, „negativen Barotaxis“, „negativen Thermotaxis“ usw. Geht dagegen die einseitige Wirkung von Nahrungsstoffen und anderen die zylindrogene Bewegung begünstigenden Faktoren aus, so findet eine Hinbewegung zu diesen statt, nämlich eine „positive Chemotaxis“ oder „Trophotaxis“ usw. Auch der galvanische Strom kann solche „Richtungsbewegungen“ hervorrufen, und zwar erfolgen diese bei rhizopodoiden Plasmakörpern, soweit bekannt, gegen die Kathode hin, was als „kathodische Galvanotaxis“ bezeichnet wird (näheres über diese „taktischen“ Bewegungen bei M. Verworn, Allgemeine Physiologie, 5. Aufl., Jena 1909).

b) Theorien der Protoplasmabewegung. Von solchen kommt ernstlich nur eine in Betracht, die als „Oberflächenkräfte-Theorie“[1] bezeichnet sei. Sie wird von der überwiegenden Mehrzahl der Forscher auf diesem Gebiete (wie Berthold, Quincke, Verworn, Bütschli, Rhumbler, Jensen u. A.) vertreten, freilich in einigen verschiedenen Modifikationen; auch wollen sie manche Forscher vorläufig nur im Prinzip anerkennen, ohne ihr schon eine Anwendung auf die verschiedenen Erscheinungsweisen der Protoplasmabewegung zu gestatten. Wir wollen uns hier hauptsächlich an die von Rhumbler und Jensen weiter ausgearbeitete Form der Oberflächenkräfte-Theorie halten.

Die Theorie geht aus von dem oben charakterisierten Aggregatzustand des Ekto- und Entoplasmas und leitet im wesentlichen alle Formveränderungen resp. Bewegungen des Protoplasmas von den Gesetzen der Hydromechanik ab. Danach kommen hierfür drei Gruppen von Faktoren in Betracht, nämlich die Kräfte oder Energieformen des Flüssigkeitsinnern, der Oberflächenschicht und der Umgebung.

[1]) Man hat diese Theorie wohl auch oft als „Oberflächenspannungs-Theorie“ bezeichnet, was aber mißverständlich ist, da von den verschiedenen Oberflächenkräften gerade die „Oberflächenspannung“ hierbei die geringste Rolle spielt.

Von Kräften des Flüssigkeitsinnern ist hauptsächlich der „Binnendruck“ zu nennen, der die Oberfläche zu vergrößern strebt, von solchen der Oberflächenschicht der „Normaldruck“, „Krümmungsdruck“ und die „Oberflächenspannung“. („Normaldruck“ ist der bei ebenen Oberflächen senkrecht nach dem Flüssigkeitsinnern gerichtete Druck k; „Krümmungsdruck“ ist die durch die Krümmung einer Oberfläche noch hinzukommende, in der Richtung des Radius wirkende Druckkomponente γ, die dem Krümmungsradius umgekehrt proportional ist; die Summe von Normaldruck + Krümmungsdruck bezeichne ich kurz als „Oberflächendruck“; „Oberflächenspannung“ ist die in der Oberfläche tangential wirkende Kraft α, die für jede Flüssigkeit eine besondere Konstante ist. Es sei erwähnt, daß die Bezeichnung „Oberflächenspannung“ auch noch ganz summarisch für α, k und γ oder sonstige Kombinationen dieser Größen mißbraucht wird. Näheres hierüber bei P. Jensen, Die Protoplasmabewegung S. 26ff.).

Wir wollen unsere Theorie hauptsächlich an der Bewegung einer Amöbe erläutern. Gehen wir aus von der Kugelform; diese ist vorhanden, wenn der Oberflächendruck überall gleich und im Gleichgewicht mit dem Binnendruck ist. Denken wir uns nun ferner, daß an irgendeiner Stelle der Normaldruck und damit der Oberflächendruck kleiner sei als an den übrigen, und zwar wollen wir als einfachsten Fall annehmen, daß diese Stelle nicht mit der Unterlage der Amöbe oder sonst irgendeiner Grenzfläche in Berührung stehe.[1]) Dann wird an dieser Stelle ein Ueberwiegen des Binnendruckes stattfinden, die Flüssigkeitsmasse wird hervorbrechen und eine Ausstülpung des Tropfens, ein Pseudopodium, zustande kommen. Die Größe und Form des letzteren ist durch die Aenderung des Normaldruckes vor und während der Ausstülpung und durch die mit dieser Formveränderung verbundenen Variationen des Krümmungsdruckes bestimmt. Eine Einziehung des Fortsatzes wird dagegen erfolgen, wenn der Normaldruck cet. par. wieder zu seinem ursprünglichen oder einem höheren Werte anwächst

[1]) Dies muß besonders betont werden, da sehr häufig die Protoplasmabewegung irrtümlich völlig analog gesetzt wird der Ausbreitung eines Flüssigkeitstropfens an der Grenze zweier Medien. Die hierfür geltende Erklärung reicht aber für die Bildung der frei ins Medium sich ausstreckenden Pseudopodien keineswegs aus. Auf diesen wichtigen Punkt hat Jensen besonders nachdrücklich hingewiesen und aus diesem Grunde die häufig auf lange Strecken frei ins Medium ausstrahlenden Pseudopodien der Retikulosa als Gegenstand der mechanischen Analyse der Protoplasmabewegung gewählt.

und unter Mitwirkung des zunächst noch erhöhten Krümmungsdruckes die Pseudopodiensubstanz nach Orten des geringeren Oberflächendruckes zurückdrängt.

Von größter Wichtigkeit ist natürlich die Frage, auf welche Weise der Oberflächendruck bald vermindert bald wieder erhöht wird? Zu ihrer Beantwortung sei zunächst darauf hingewiesen, daß die Expansion von Pseudopodien stets gerade durch dieselben Bedingungen begünstigt wird wie die Assimilierung (vgl. den Artikel „Leben"), nämlich durch Nahrung, speziell Sauerstoff, durch höhere Temperaturen[1]) innerhalb gewisser Grenzen usw., während die Kontraktion durch die gleichen Faktoren gefördert wird wie die Dissimilierung, nämlich durch die „allgemeinen Reize". Daraus darf man folgern, daß im allgemeinen der Oberflächendruck dort am geringsten sei und zur Bildung oder Verlängerung eines Pseudopodiums führen, also spontan eine Bewegung des Protoplasmas veranlassen wird, wo die Assimilierung am stärksten ist, und daß umgekehrt der Oberflächendruck dort zunehme und zur Kontraktion Anlaß gebe, wo die Dissimilierung überwiegt oder die Assimilierung verhältnismäßig am geringsten ist. Näheres über diesen Erklärungsversuch und besonders auch darüber, wie man aus den chemischen Aenderungen des Protoplasmas bei der Assimilierung und Dissimilierung etwa die Aenderungen des Oberflächendruckes ableiten könnte, findet man bei Jensen (Die Protoplasmabewegung S. 29ff.); dieser Erklärungsversuch ist auch von Rhumbler (Die Foraminiferen der Plankton-Expedition, Erster Teil, S. 225ff., Kiel 1911) übernommen worden. Ferner hat Jensen am genannten Orte auch einen Ueberblick über die bei der Protoplasmabewegung etwa anzunehmenden Energieverwandlungen gegeben.

Von den angedeuteten theoretischen Grundlage aus lassen sich im wesentlichen alle einzelnen Erscheinungen der Protoplasmabewegung dem Verständnis nahe bringen: Der „Ento-Ektoplasma-Prozeß" kann auf das wechselnde Verhältnis zwischen Assimilierung und Dissimilierung zurückgeführt werden; desgleichen sonstige Aenderungen des physikalischen Zustandes des Protoplasmas, wie etwaiger Wechsel von Sol- und Gelzustand, dem Rhumbler eine besondere Bedeutung beilegt; ebenso alle Formveränderungen der Pseudopodien der Filosa und Retikulosa bei der Erregung, sowie die Erscheinungen, die das des Zellkerns beraubte Protoplasma darbietet. Endlich sind auch die Erscheinungen, die bei der Ausbreitung auf festen Unterlagen überhaupt an Grenzflächen (vgl. S. 1070) auftreten, ferner diejenigen der Nahrungsaufnahme, der Stoffabgabe, der Chemotaxis und aller anderen Richtungsbewegungen nach der vorliegenden Theorie verständlich zu machen. Am meisten Schwierigkeiten bereitet in dieser Hinsicht wohl die komplizierte Körnchenströmung der Retikulosa; doch kommt man hier bei genügender Berücksichtigung der aus triftigen Gründen anzunehmenden „Anhomogenitäten" des Oberflächendruckes auch zum Ziele wie Rhumbler (Die Foraminiferen, S. 255ff. und a. a. O.) dargelegt hat. Auch für die ebenfalls sehr verwickelte Zirkulations- und Rotationsbewegung gilt ähnliches; hier sind zahlreiche Anlässe für die fortwährende Neuentstehung von Anhomogenitäten gegeben, von denen sich im Prinzip alle Innenströmungen, auch bei Lobosen und Infusorien, hydromechanisch ableiten lassen.

Als eine wertvolle Bestätigung der Oberflächenkräfte-Theorie der Protoplasmabewegung sei endlich noch die Tatsache genannt, daß sich alle wesentlichen Erscheinungen der letzteren an anorganismischen „flüssigen" Systemen nachahmen lassen, wie besonders Rhumbler gezeigt hat. Daß daraus selbstverständlich nur eine Uebereinstimmung in der Mechanik, nicht aber hinsichtlich der chemischen Prozesse bei den beiden Gruppen von Erscheinungen gefolgert werden darf, ist in dem Artikel „Leben" betont worden.

In das Gebiet der Theorie gehört auch die Frage, ob die rhizopodoiden Plasmakörper bei ihren Bewegungen vielleicht irgend etwas „Psychisches" erleben? Auf die Annahme von solchem ist man wohl besonders durch die Reizbewegungen geführt worden, indem man sich vorstellte, daß der Plasmakörper den Reiz „empfinde" und dementsprechend reagiere. Tatsächlich aber können wir garnichts darüber aussagen, ob die „physischen" Prozesse der Erregung hier mit irgendwelchen „psychischen" Prozessen verbunden sind, wie dies z. B. für die physischen Vorgänge in den Neuronen der Fühlsphäre des Großhirns sicher anzunehmen ist. Will man in ähnlicher Weise auch den rhizopodoiden Plasmakörpern „Empfindungen" und sonstiges „Psychische" zusprechen, so muß man sich dieses jedenfalls um ebensoviel primitiver vorstellen, wie z. B. eine Amöbe in physischer Hinsicht einfacher ist als ein Mensch. Und zwar könnte man sich die chemisch-physikalischen Aenderungen des Plasmakörpers, die durch einen Reiz ausgelöst werden, mit bestimmten, ganz einfachen „Empfindungen" verbunden denken usw. Doch sei besonders betont, daß

---

[1]) Der von W. Biedermann (Ergebnisse d. Physiol., Jahrg. 8, S. 140) hieran geknüpfte Einwand dürfte durch meine Ausführungen in der Zeitschrift für allgem. Physiol. Bd. 8, S. 339, 1908 entkräftet werden.

durch Anschauungen dieser Art unsere Erklärungsversuche der Protoplasmabewegung in keiner Weise berührt werden. Denn das etwaige „Psychische“ wäre keineswegs ein Glied in der Kette der physischen Aenderungen, ebensowenig wie dies z. B. für die blauviolette Farbe gilt, die an bestimmte chemische Prozesse bei der „Biuretreaktion“ der Eiweißkörper gebunden ist (über das Verhältnis des „Physischen“ und „Psychischen“ siehe auch den Artikel „Leben“).

III. Flimmerbewegung. Während bei der Muskel- und Protoplasmabewegung die ganzen die Bewegung erzeugenden Zellen oder Zellkomplexe kontraktil sind oder doch Massenverschiebungen zeigen, sind es bei der Flimmerbewegung nur kleine Teile oder Anhänge der im übrigen sehr häufig nicht nennenswert kontraktilen Zellen, welche die Kontraktionsbewegungen ausführen. Diese gewöhnlich kurz-haarförmigen Anhänge oder Fortsätze, die dauernd vorhanden sind, können recht verschiedene Formen haben; je nachdem werden sie als „Flimmerhaare“, gleichbedeutend mit „Zilien“ und „Wimpern“, oder als „Geißeln“ oder als „Zirren“ usw. bezeichnet. Wir wollen diese Gebilde alle mit Pütter unter dem Namen „Zilie“ (i. w. S.) zusammenfassen. Ihre Bewegung läßt sich in Kürze etwa definieren als eine abwechselnde aktive Beugung und Streckung, wodurch entweder Körper, die von dem Zilienschlag getroffen werden, oder die Flimmerzellen selbst fortbewegt werden.

Die Flimmerbewegung ist im Tier- und Pflanzenreich außerordentlich verbreitet und im ersteren fehlt sie fast keiner Gruppe. Ihre ökologische Bedeutung ist im wesentlichen eine dreifache: Sie dient erstens der Fortbewegung irgendwelcher Massen in Hohlräumen von Organismen, wie z. B. beim Menschen der Herausbeförderung von Staub und Schleim aus der Luftröhre und ihren Verzweigungen, ferner der Fortbewegung des Eies von dem Eierstock in den Uterus, ferner bei vielen Tieren der Fortschiebung von Nahrungspartikeln im Darmkanal usw.; zweitens besorgt sie die Herbeischaffung von Nahrungsbestandteilen einschließlich des im Wasser absorbierten Sauerstoffs durch Erzeugung von Strömungen im Wasser, wie das bei den die Mundöffnung umgebenden Flimmerapparaten von Infusorien, dem flimmernden Schlundrohr bei Korallen usw., den flimmernden Kiemen bei Würmern usw. der Fall ist; drittens ermöglicht die Flimmerbewegung die Ortsbewegung zahlreicher Organismen, nämlich bei allen freibeweglichen Infusorien, bei den Samenzellen der Tiere einschließlich des Menschen, bei den Schwärmsporen der Pflanzen und unter den vielzelligen lebendigen Systemen bei vielen flimmernden Larven, bei den Ktenophoren, zahlreichen Würmern, wie den Rotatorien usw.

Zur ökologischen Charakteristik der Flimmerapparate muß dann noch hervorgehoben werden, daß sie besonders bei solchen Organismen, die sich durch sie bewegen, neben ihrer motorischen Funktion noch eine wichtige Rolle als Tastorgane spielen. Die Zilien sind gegen Berührung, Druck und Stoß sehr empfindlich, weshalb ihre Bewegungen durch derartige Einwirkungen in hohem Maße beeinflußt werden. Es kann die motorische Funktion gegenüber einer derartigen sensiblen sogar ganz zurücktreten, wie das bei den „Sinneshaaren“ verschiedener sensibler Apparate der Fall ist (näheres über das in diesem Abschnitt behandelte findet man hauptsächlich bei A. Pütter, Die Flimmerbewegung. In Ergebnisse der Physiologie, Jahrgang 2, Abteilung 2, S. 1, 1904).

Wie schon angedeutet wurde, gibt es sehr verschiedene Formen der Flimmerbewegung. Diese ist einerseits nach Zahl, Anordnung und Zusammenwirken der Zilien verschieden, andererseits nach der Gestalt und Bewegungsform der einzelnen Zilie. Hierüber wird später näheres angegeben werden.

Die fernere Darstellung wird analog derjenigen der Protoplasmabewegung sein.

a) Tatsächliche Erscheinungen. Wir erhalten hier im Vergleich zur Protoplasmabewegung eine Erhöhung der Mannigfaltigkeit der Erscheinungen durch den Umstand, daß die Flimmerbewegung sowohl an einzelligen Organismen mit nur 1 Zilie vorkommt als auch an solchen mit mehreren in bestimmter Koordination zusammenwirkenden Zilien als auch endlich an Komplexen von Flimmerzellen, dem „Flimmerepithel“, wo sich ebenfalls normalerweise eine bestimmte Koordination der Bewegungen der sämtlichen Zilien zeigt.

Wie bei der Protoplasmabewegung liegt auch hier der Schwerpunkt unserer Kenntnisse auf morphologischem Gebiet. Bezüglich etwaiger „psychischer“ Erscheinungen siehe S. 1071 und 1077.

α) Erscheinungen beim Fehlen äußerer Reize. Auch hier ist, wie bei der Protoplasmabewegung, im allgemeinen keine scharfe Grenze zu ziehen zwischen den Erscheinungen der „Ruhe“ und der „Erregung“.

aa) Morphologische Erscheinungen. Wir haben uns hier zunächst mit dem Bau der Zilien und der zugehörigen Zellkörper und dann mit ihrer Bewegungsart, wie sie sich beim Fehlen von Reizen zeigt, zu befassen. An die Besprechung der Bewegung der einzelnen Zilie ist dann die des eigenartigen geordneten Zusammenwirkens mehrerer Zilien anzuschließen, und zwar einerseits für den Fall, daß die einzelnen Zilien derselben Zelle, andererseits für den

Fall, daß sie verschiedenen Zellen, also einem Flimmerepithel, angehören. Wir wollen unserer Darstellung hauptsächlich eine der einfachsten und häufigst vorkommenden Zilienformen und Zilienbewegungen zugrunde legen, wie wir sie im allgemeinen bei Flimmerepithelien finden.

Das Flimmerepithel (z. B. der Rachenschleimhaut des Frosches, der Luftröhrenschleimhaut des Menschen, der Darmschleimhaut von Muscheln) besteht aus einzelnen durchschnittlich zylindrischen Zellen, die auf ihrer freien Oberfläche mehrere Zilien tragen und in ihrem Innern im allgemeinen eine bestimmte Struktur darbieten. Diese ist durch einige Gebilde ausgezeichnet, deren engere anatomische und physiologische Zugehörigkeit zu den Zilien in die Augen springt. Wir können daher von einem Zilienapparat oder Flimmerapparat sprechen, der in den zugehörigen Zellkörper eingebettet ist. Der letztere besitzt außerdem Protoplasma, einen Zellkern und bisweilen ein Zentrosom („Diplosom"), die keine besonderen Eigentümlichkeiten zeigen.

Von dem Flimmerapparat wollen wir zunächst nur eine einzelne Zilie mit allem Zugehörigen betrachten. An diesem als „Flimmerelement"[1]) zu bezeichnenden Komplex unterscheiden wir mit der Mehrzahl der Autoren einerseits einen starren, nicht protoplasmatischen Teil, der in der Achse der Zilie liegt und mehr oder minder tief in den Zellkörper hineinreicht, andererseits einen protoplasmatischen Teil, der den starren umkleidet. Beide Teile bieten bei verschiedenen Flimmerzellen große Variationen dar; hier soll nur ein einfacher Durchschnittstypus, der aber alles wesentliche zeigt, wie etwa die Flimmerzellen aus dem Darm einer Muschel (Anodonta), behandelt werden.

Beginnen wir mit dem protoplasmatischen Teil des Flimmerelements. Er besteht bei der Zilie selbst in einem feinen zylinderförmigen, gegen 0,2 μ dicken und mehrere μ langen Fortsatz der zähen äußeren, hyalinen Protoplasmaschicht der Flimmerzelle, die man als „Zellsaum" oder „Crusta" bezeichnet. Der starre Teil des Flimmerelements ist im wesentlichen aus 4 Stücken zusammengesetzt: erstens dem „Achsenfaden", der in der Achse der Zilie verläuft; zweitens dem „Zwischenstück", nämlich der Fortsetzung des Achsenfadens, die den Zellsaum durchbohrt; drittens dem „Basalkorn" oder „Basalkörperchen", einer kugeligen Verdickung, die das Zwischenstück unmittelbar unterhalb des Zellsaumes zeigt, und viertens der „Wimperwurzel" oder „Faserwurzel", einem fadenförmigen Gebilde, das sich vom Basalkorn aus in die Tiefe des Zelleibes erstreckt.

Die Formänderungen, welche die Zilie bei der spontanen Bewegung darbietet, bestehen in einer abwechselnden Beugung und Streckung, die in derselben Ebene erfolgen; man hat diese Art der Bewegung gegenüber vielen anderen ebenfalls vorkommenden als „hakenförmige" bezeichnet. Im gestreckten Zustande („Ruhestellung") steht die Zilie etwa senkrecht auf der Zelloberfläche. Die Beugung wird auch „Kontraktion" oder „Vorschwingung", die Streckung „Expansion" oder „Rückschwingung" genannt. Es sei hier schon erwähnt, daß die Kontraktion mit größerer Kraft und Geschwindigkeit erfolgt als die Expansion; daher kommt in der Richtung der Kontraktion, die als „Schlagrichtung" bezeichnet wird, der mechanische Effekt zustande (vgl. auch S. 1053 f.). Die Bewegung ist, wie schon bemerkt, eine automatische oder spontane und wiederholt sich in einem bestimmten Rhythmus.

Ehe wir den verschiedenen Formen und Bewegungsarten der Zilien anderer Flimmerzellen näher treten, wollen wir auf die Gesamtheit der Zilien der Flimmerzelle und des Flimmerepithels sowie auf ihr Zusammenwirken einen Blick werfen. Die Zilien sind auf der freien Oberfläche der Zellen ganz regelmäßig angeordnet und ebenso die übrigen Teile der Flimmerelemente im Innern der Zellen. Besonders hervorzuheben ist, daß die Wimperwurzeln (Faserwurzeln) bei unserem Beispiel (wie auch bei den meisten anderen Flimmerzellen) nicht wie die übrigen Stücke der Flimmerelemente parallel nebeneinander liegen, sondern nach einem von der Zelloberfläche ziemlich weit entfernten Punkte konvergieren, also einen kegelförmigen Körper bilden. Manche Autoren haben gemeint, daß die Spitze dieses Kegels dem Zellkern aufsitze, was aber nur bei ganz wenigen besonderen Zellen vorkommt (Näheres hierüber bei Pütter l. c. und bei H. Erhard, Studien über Flimmerzellen, Archiv für Zellforschung, Bd. 4, S. 309, 1910).

Der Bewegungstypus der Gesamtheit der Zilien einer Zelle und eines epithelialen Zellkomplexes ist in unserem Beispiel, wie auch in den meisten anderen Fällen, derart, daß die einzelnen Zilien sich nicht alle regellos oder auch gleichzeitig beugen und strecken, sondern in bestimmter Reihenfolge nacheinander. Denken wir uns zur Erläuterung eine flimmernde Fläche aus einzelnen in der Schlagrichtung parallelen Wimperreihen zusammengesetzt, so beginnt in diesen die Kontraktion zwar gleichzeitig bei allen in der Querrichtung nebeneinander stehenden Zilien; die Zilien derselben Reihe aber

[1]) Die obige Definition des „Flimmerelementes" weicht etwas von der von Pütter (l. c. S. 11) angewandten ab.

schlagen derart, daß eine jede erst dann sich zu beugen beginnt, wenn die in der Schlagrichtung hinter ihr stehende hiermit schon den Anfang gemacht hat. Da die ganze Bewegung der Zilie, also Kontraktion nebst Expansion, kürzer als eine Sekunde dauert und nach sehr viel kürzerer Pause immer wieder von neuem anhebt, so kommen auf diese Weise Wellen zustande, die über die sämtlichen Zilienreihen, und zwar in allen gleichphasig, hinlaufen. Man pflegt diesen Vorgang in zutreffender Weise mit dem Wogen eines Kornfeldes zu vergleichen, über das der Wind hinstreicht.

Es ist verständlich, daß durch den geschilderten Vorgang einerseits ein Fortschieben von festen Partikelchen sowie auch Flüssigkeitsströmungen an der flimmernden Fläche in der Schlagrichtung zustande kommen müssen, andererseits Lokomotionen freibeweglicher Flimmerzellen, ähnlich der Fortbewegung eines Ruderbootes.

Hier sei ein Hinweis auf die Fortpflanzung der „Flimmerwelle" bei Schädigung der Kontinuität des Epithels angefügt: Wenn man in einem Flimmerepithel (oder auch dem flimmernden Ektoplasma eines Infusors) quer zur Schlagrichtung einen Einschnitt macht, so geht in der Regel die Bewegungswelle nicht über diesen hinüber, sondern es zeigen jetzt beide Abschnitte voneinander unabhängige Wellen. Doch kommt es vor, daß in dem Falle, wo die über die Schnittstelle hinüberschlagenden Zilien die jenseits befindlichen berühren, doch die Welle in ziemlich einheitlicher Weise über die Schnittwunde hinüberläuft (vgl. M. Verworn, Studien zur Physiologie der Flimmerbewegung. In Pflügers Archiv f. d. ges. Physiologie, Bd. 48, 1890).

Wie schon angedeutet, gibt es eine große Mannigfaltigkeit verschiedener Zilien. Diese lassen sich in zwei Gruppen einteilen: Erstens in relativ einfache Gebilde verschiedener Art; hierher gehören die verschiedensten „Wimpern" von der oben besprochenen Form, ferner die vielen sehr mannigfaltigen „Geißeln" der flagellaten Infusorien, Spermatozoen usw. sowie endlich die „Tentakeln" der eigenartigen Sarkodinengruppe der Suktorien; diese Tentakeln sind Gebilde, die einen phylogenetischen Uebergang von Pseudopodien zu Zilien darstellen, der auch durch die mitunter vorkommende Verwandlung der einen in die anderen bestätigt wird (siehe hierüber H. Erhard a. a. O. S. 344ff.). So mannigfaltig wie die Gestalten der Zilien sind auch ihre Bewegungsformen; neben den verschiedenen „hakenförmigen" finden wir auch „peitschenförmige", „schraubenförmige" usw., auch können manche Zilien sich verkürzen, indem sie ein Stück weit in den Zellkörper hineingezogen werden. Besonders wichtig für die Theorie der Zilienbewegung ist die Tatsache, daß in vielen Fällen dieselbe Zilie je nach den Bedingungen recht verschiedenartige Bewegungen auszuführen vermag.

Die zweite Gruppe von Zilien kann man sich entstanden denken aus der Verschmelzung mehrerer einfacher Zilien. Derartige Gebilde sind die „Zirren", „Borsten", „undulierenden Membranen" usw. von Infusorien, die „Ruderplättchen" der Ktenophoren usw. Hier finden wir dann mit der Anpassung der Form an bestimmte Leistungen eine Menge von spezifischen Eigentümlichkeiten der Bewegung (Näheres besonders bei Pütter a. a. O. S. 11ff.).

So mannigfaltig wie die Zilien sind auch die übrigen Bestandteile (wie Zwischenstücke, Basalkörper und Wimperwurzeln) der verschiedenen Flimmerelemente und überhaupt die ganzen zugehörigen Zellkörper. Und ferner kann derselbe Zellkörper mit mehreren verschiedenartigen Flimmerelementen ausgerüstet sein, wie z. B. eine große Anzahl der ziliaten Infusorien. Daher sind natürlich auch die motorischen Gesamtwirkungen solcher verschiedenen Flimmerzellen sehr mannigfaltig; es sei z. B. nur an das ziemlich gleichmäßige Umherschwimmen der „holotrichen" Infusorien und an das „Gehen" und zeitweilige „Springen" der „Hypotrichen" erinnert.

bb) Chemische Erscheinungen. Man darf annehmen, daß der chemische Aufbau und die chemischen Prozesse der Flimmerzellen im wesentlichen denjenigen anderer Plasmakörper gleichen. Das gilt im besonderen auch für die Zilien, die nachweislich größtenteils aus eiweißhaltigem Protoplasma bestehen. Von Besonderheiten desselben ist aber nichts bekannt.

cc) Physikalisch-energetische Erscheinungen. Das meiste hierher Gehörige ist schon in dem Morphologischen enthalten. Nur auf einige Punkte ist noch kurz einzugehen, nämlich auf die physikalische Beschaffenheit der Zilien, auf das Zustandekommen des motorischen Effekts und auf die Kraft der Zilien.

Ueber die Frage, ob die Zilien wirklich doppelbrechend seien, was man mit Engelmann bisher angenommen, ist Näheres bei Erhard l. c. S. 319 zu lesen. Dort findet man ferner auf S. 389ff. die Begründung der Ansicht, daß der Achsenfaden, Basalkörper usw. starre Stützgebilde sind, während die übrige Substanz der Zilien gleich der des Zellsaumes (Crusta) aus hyalinem Protoplasma besteht, dem man auch hier am ehesten den Aggregatzustand einer zähen „Flüssigkeit" (im Sinne von oben S. 1059) zusprechen wird.

Der stets in der „Schlagrichtung" statt-

findende motorische Effekt kommt, wie schon angedeutet, dadurch zustande, daß die Kontraktion der Zilien, die eben die „Schlagrichtung" angibt, mit größerer Kraft und Geschwindigkeit erfolgt als die Expansion. Daraus ergibt sich ohne weiteres, daß die Kontraktion (Beugung, Vorschwingung) einen größeren mechanischen Effekt erzielen muß als die Expansion (Streckung, Rückschwingung), weshalb erstere auch der „wirksame" Schlag genannt wird.

Man hat in verschiedenen Fällen die Kraft dieses wirksamen Schlages zu ermitteln gesucht, durch Bestimmung des Gewichtes, das eine bestimmte flimmernde Fläche oder Wimpermasse zu heben oder fortzuschieben vermag. Doch sei auf nähere Angaben, die man an verschiedenen Orten findet, hier verzichtet.

Bezüglich einer etwaigen Produktion von Wärme und elektrischer Energie durch Flimmerzellen gilt im wesentlichen das für rhizopodoide Plasmakörper Ausgeführte.

Endlich sei hier am Schluß der Darstellung der Erscheinungen der spontanen Flimmerbewegung noch ihrer Abhängigkeit von einigen äußeren und inneren Bedingungen gedacht: Bis zu einer gewissen Grenze wird die Flimmerbewegung mit zunehmender Temperatur beschleunigt, mit abnehmender verlangsamt. Ferner ist eine gewisse Sauerstoffzufuhr nötig, indem bei längerer Vorenthaltung desselben die Bewegung nachläßt. In das Gebiet der Abhängigkeit von inneren Bedingungen gehört die Frage, ob die Zilien sich auch nach Lostrennung vom Zellkörper noch bewegen können. Bei einigen Zilien ist dies in der Tat der Fall, die meisten aber brauchen zur spontanen Bewegung mindestens das Stückchen des Zellsaumes oder überhaupt der obersten Zellschicht, von dem sie entspringen; Basalkörner sind nach den neueren Untersuchungen hierzu nicht erforderlich, ebensowenig etwaige Zentrosomen (siehe Erhard a. a. O. S. 381ff.).

β) Erscheinungen bei Einwirkung äußerer Reize. Im allgemeinen ist hier dasselbe gültig, was über die Wirkung von Reizen auf die Protoplasmabewegung ausgeführt wurde. Hinzuzufügen ist noch, daß die Wirkung entweder in einer Beschleunigung oder einer Verlangsamung bis zum Stillstand oder in einer Richtungsänderung des wirksamen Schlages oder endlich in einer Bewegung vorher ruhender Zilien bestehen kann; letztere Erscheinung finden wir bei einigen Infusorien. Die verschiedensten Reize vermögen solche Wirkungen auszuüben. Am häufigsten kommen mechanische und chemische Reize in Betracht. Sehr charakteristisch und viel untersucht sind auch die Erfolge elektrischer Reizung. Wir wollen diesmal die morphologischen und physikalisch-energetischen Erscheinungen gemeinsam behandeln. Zur Frage etwaiger psychischer Erscheinungen werden wir uns erst im theoretischen Teil wenden.

aa) Morphologische und physikalisch-energetische Erscheinungen. Am mannigfaltigsten und besten zu untersuchen sind diese Erscheinungen bei den verschiedenen Infusorien. Beobachtet man ein Paramaecium aurelia, das vermöge des automatisch-rhythmischen und koordinierten Schlagens seiner über die ganze Körperoberfläche gleichmäßig verteilten Zilien ruhig durch das Wasser schwimmt, unter dem Mikroskop, so sieht man in dem Augenblick, wo man das Tier durch einen Stoß auf den Objekttisch mechanisch reizt, eine vorübergehende Beschleunigung seiner Zilienbewegung. Ein umgekehrter Erfolg kann bei leiser Berührung auftreten. Wenn ein Paramaecium nämlich einen chemisch-indifferenten Körper, wie z. B. ein Stückchen Filtrierpapier, mit seinen Wimpern berührt, so stellen diese Zilien in Ruhelage ihre Bewegung völlig ein und auch der Schlag der übrigen Zilien ist stark verlangsamt. Endlich läßt sich bei Paramaecium auch leicht eine Richtungsänderung des wirksamen Schlages hervorrufen: Wenn man durch einen Wassertropfen, der diese Infusorien enthält, einen galvanischen Strom leitet, so wird z. B., wenn das hintere Körperende nach der Kathode gerichtet ist, hier die Richtung des wirksamen Wimperschlages die umgekehrte wie in der Norm. Dieselbe Umkehrung tritt bei allen Zilien ein, wenn das Paramaecium an einen festen Körper anstößt. Auf die mannigfachen Wirkungen der verschiedenen Reize auf die verschiedenen Zilienformen kann hier nicht eingegangen werden (siehe hierüber Pütter a. a. O. und M. Verworn, Allgemeine Physiologie, 5. Auflage, Jena 1909).

Wenden wir uns jetzt zur Betrachtung der Frage, in welcher Weise das Zusammenwirken der einzelnen Zilien durch Reize beeinflußt wird. Da ist zunächst zu bemerken, daß die Wirkung eines Reizes, der nur eine oder nur einige wenige Zilien trifft, sich auf sämtliche Zilien einer Zelle und auch auf eine große Anzahl von Zellen eines Flimmerepithels ausbreiten kann. Das zeigen für die einzelne Zelle z. B. die oben erwähnten Erscheinungen bei lokaler mechanischer Reizung von Paramaecium. Für das Flimmerepithel diene zur Erläuterung die Tatsache, daß z. B. bei der flimmernden Rachenschleimhaut des Frosches ein lokal applizierter Reiz eine Erregung in dem ganzen in der Schlagrichtung liegenden übrigen Teil des Epithels zur Folge hat, während die Ausbreitung der Erregung entgegen der

Schlagrichtung sowie quer und schräg zu ihr mehr oder minder beschränkt ist.

Es liegt nahe zu fragen, wie hier die Fortleitung der Erregung stattfindet, ob von Zilie zu Zilie durch Berührung beim Schlagen oder durch protoplasmatische Leitung innerhalb der Zellen und Zellkomplexe oder endlich durch Vermittlung von Nerven. Die beiden erstgenannten Uebertragungsweisen kommen tatsächlich vor; die erstere finden wir z. B. beim Ueberspringen einer Schnittwunde durch die Flimmerwelle (siehe S. 1074); daß auch die zweite Art der Fortleitung nicht fehlt, ergibt sich aus der Tatsache, daß in der Rachenschleimhaut des Frosches sich bei einem lokal applizierten Reiz die Erregung auch dann noch in der oben angegebenen Weise ausbreitet, wenn sie Strecken passieren muß, wo die Zilien durch experimentelle Eingriffe zum Stillstand gebracht sind (vgl. H. Kraft, Zur Physiologie des Flimmerepithels bei Wirbeltieren. In Pflügers Archiv für die ges. Physiologie, Bd. 47, 1890). Eine Mitwirkung von Nerven, und zwar von motorischen, scheint dagegen nur ganz vereinzelt stattzufinden, wie z. B. bei Anneliden: freilich sind sensible Nerven bei solchen Flimmerzellen, die besonders an Tastfunktionen angepaßt sind, weniger selten (vgl. Pütter a. a. O. S. 67).

Nach dem Ausgeführten können wir also über die Erregung der Flimmerelemente sagen, daß die in ihnen selbst begründete automatische Bewegung durch Einwirkung von Reizen auf die Zilie wie auch auf den zugehörigen Zellleib beeinflußt werden kann. Ob bei der ersteren Art der Beeinflussung etwa erst eine „sensible“ Erregung die Zilie durchläuft und erst sekundär eine motorische Erregung (so daß ein richtiger Reflex vorläge) oder ob hierbei nur ein einziger Erregungsprozeß stattfindet, darüber ist nichts bekannt.

Endlich sei hier noch erwähnt, daß durch Beeinflussung des Wimperspieles freibeweglicher Flimmerzellen durch verschiedene Reize entsprechende „taktische“ Bewegungen zustande kommen können, analog der Chemotaxis, Geotaxis, Galvanotaxis usw. der rhizopodoiden Plasmakörper (vgl. S. 1070).

bb) Chemische Erscheinungen. Ueber die Aenderungen des Stoffwechsels bei der Erregung der Flimmerzellen haben wir keine Erfahrungen, dürfen uns diese aber wohl ähnlich den beim Muskel und anderen lebendigen Systemen festgestellten denken.

b) Theorien der Flimmerbewegung. Die Erklärungsversuche und Theorien der Flimmerbewegung haben hauptsächlich drei Tatsachen zu berücksichtigen, nämlich das Zustandekommen der Bewegung der einzelnen Zilie, ihre Automatie nebst Rhythmus und das geordnete Zusammenwirken der Gesamtheit der Zilien.

Was es von Theorien der Flimmerbewegung gibt, schließt sich meistens den verschiedenen Theorien der Protoplasmabewegung an, von der, wie oben erwähnt, Uebergänge zur Flimmerbewegung vorhanden sind. Wir wollen daher auch hier diejenigen theoretischen Anschauungen Platz finden lassen, die mit dem oben angeführten Erklärungsversuch der Protoplasmabewegung im Zusammenhang stehen. Die folgenden Vorstellungen dieser Art sehen wir im wesentlichen vertreten von Verworn (Allgemeine Physiologie), Pütter (a. a. O.) und Erhard (a. a. O.). Angaben über einige nicht ansprechende anderweitige Erklärungsversuche machen außerdem die beiden letztgenannten Autoren.

Demnach führen wir die Bewegung einer Zilie zurück auf eine abwechselnde Kontraktion und Expansion ihres protoplasmatischen äußeren Teils. Und zwar müssen diese Aenderungen bei der gewöhnlichen „hakenförmigen“ Bewegung nur auf einer Seite, nämlich der des wirksamen Schlages, stattfinden. Für die Zilien der meisten Flimmerzellen werden wir am besten mit Erhard annehmen, daß die Kontraktion auf der genannten Seite der Zilie an demjenigen Punkte ihren Ursprung nimmt, wo die Zilie in den Zellsaum übergeht; und von dort würde sich die Kontraktion auf einer schmalen Bahn, der „Kontraktionslinie“, auf derselben Seite gegen die Spitze der Zilie hin ausbreiten. Die Kontraktionslinie ist bei Zilien mit variabler Schlagrichtung ebenfalls variabel und ferner ist sie der Bewegungsform entsprechend geformt, z. B. bei „schraubenförmiger“ Bewegung spiralig usw. Dem ganzen System von Achsenfaden, Zwischenstück, Basalkorn und Wimperwurzel werden wir mit Erhard am besten eine passive Rolle zusprechen: der elastische Achsenfaden wird bei der Kontraktion mitgebogen und unterstützt durch seine elastischen Kräfte die Expansion; Basalkörper und Wimperwurzel dienen zu seiner Verankerung. Durch irgendwelche Zug- oder Druckeinwirkungen des Protoplasmakörpers auf die Wimperwurzeln könnten auch die bisweilen vorkommenden Verkürzungen der Zilien bedingt sein.

Der Wechsel zwischen Kontraktion und Expansion läßt sich wie bei der Protoplasmabewegung auf gewisse, mit dem Verhältnis von Assimilierung und Dissimilierung wechselnde, Aenderungen der Oberflächenkräfte, hier speziell der Oberflächenspannung, des Zilienprotoplasmas zurückführen; auch reversible Gelbildungen könnten dabei mitwirken.

Wir kommen nun zur Frage, wie ohne Einwirkung von Reizen die Kontraktion der

Zilien zustande kommt, also zur Frage der Automatie und Rhythmizität der Bewegung. Man hat hierfür besondere „kinetische Zentren" verantwortlich machen wollen und eine derartige Rolle neuerdings besonders dem Basalkörperchen oder wohl auch dem Zentrosom zugeschrieben. Die triftigen Gründe, die einer derartigen Vorstellung widerstreben, hat Erhard (a. a. O.) zusammengestellt. Am nächsten liegt die Hypothese, daß die Stelle an der Zilienbasis, wo die Kontraktion ihren Anfang nimmt, auch ohne Einwirkung von Reizen schon ein Ueberwiegen der Dissimilierung über die Assimilierung zeigen kann, wie das in analoger Weise zur Erklärung der spontanen Kontraktion von Pseudopodien angenommen wurde. So erfolgt also die spontane Kontraktion der Zilie und durch die Selbststeuerung des Stoffwechsels (vgl. den Artikel „Leben") wird dann die Expansion herbeigeführt. Ist die letztere beendet und die Zilie wieder auf dem Höhepunkt ihrer Erregbarkeit, so setzt von neuem die spontane Kontraktion ein usw. Damit ist auch der Rhythmus des Schlagens gegeben.

Dem Versuch, das geordnete Zusammenwirken der Zilien verständlich zu machen, müssen wir die Besprechung der Fortleitung der Erregung durch Zilie und Zellkörper vorausschicken. Die Fortpflanzung der Erregung durch die Zilie hindurch und von Zilie zu Zilie mittels des sie verbindenden Zellkörpers bereitet nicht mehr Schwierigkeiten als jede andere Erregungsleitung. Auch die Fortleitung durch ein ganzes flimmerndes Epithel kann man sich einigermaßen vorstellen: Man darf wohl annehmen, daß bei der Bewegung jeder Zilie Druck- und Zugwirkungen an ihrer Ansatzstelle (und vielleicht auch im Bereich des ganzen Stützapparates) stattfinden, und diese könnten Schritt für Schritt die Erregung weitergeben. Eine gewisse Schwierigkeit erhebt sich hierfür vielleicht an der Grenze zweier Zellen und diese wird noch größer für den Fall, daß die Erregung durch eine Epithelstrecke hindurchgeht, in der die Zilien nicht schlagen (vgl. S. 1076). Hier müssen wir dann mit einer protoplasmatischen Leitung nach Art derjenigen im Sarkoplasma des Muskels rechnen, die vielleicht auch allein die Uebertragung aller Erregungen besorgt; sie könnte im Zellsaum oder auch in tieferen Teilen der Zellen vor sich gehen und müßte imstande sein, die Zellgrenzen zu durchsetzen.

Was nun die Unterordnung der Automatie jeder Zilie unter die gemeinsame Bewegung der Gesamtheit anbetrifft, so scheint mir diese nicht so schwer verständlich zu sein, wie man nach den Darstellungen dieses Gegenstandes vermuten sollte. Zur Erläuterung der Sachlage wollen wir uns z. B. zwei nebeneinanderstehende Zilien denken, die zurzeit nicht in der oben geschilderten Koordination schlagen. Nehmen wir an, die in der Schlagrichtung voranstehende Zilie II strecke sich in demselben Augenblick, wo Zilie I sich kontrahiert. Bei der Kontraktion von Zilie I wird nun auf einem der oben angedeuteten Wege ein Reiz auf Zilie II ausgeübt. Er trifft sie in dem Moment, wo sie zwar nach ihrem automatischen Rhythmus noch nicht wieder so erregbar ist, daß sie von selbst schlagen würde; aber wir dürfen nach Analogie der „Extrasystole" des Herzens (vgl. den Artikel „Kreislauf des Blutes") vermuten, daß durch den Reiz auch jetzt schon eine, wenn auch schwächere Kontraktion von Zilie II ausgelöst wird. Hiernach folgt nun eine Pause, nicht viel anders, als wenn die Zilie vorher spontan geschlagen hätte. Von jetzt an würde daher diese Zilie auch spontan in demselben Augenblick zu schlagen beginnen, in dem beim Ablauf der Kontraktionswelle die Reihe an sie kommt. Auf diese Weise würde jede einmal außer der Reihe schlagende Zilie sofort wieder in den allgemeinen Rhythmus hineingezwungen.

Ueber etwaige „psychische" Vorgänge in Flimmerzellen gilt im wesentlichen das bei der Protoplasmabewegung Ausgeführte. Man möchte vielleicht geneigt sein, besonders bei den freibeweglichen Flimmerzellen und Komplexen, wo auch die „Tastfunktionen" der Zilien mehr ausgeprägt sind, an das Auftreten ganz primitiver „Empfindungen" etwa beim Anstoßen an feste Körper und bei Einwirkung sonstiger Reize zu denken. Es könnte dann entweder derselbe Erregungsprozeß der Zilien und des Zellkörpers sein, der zugleich mit der primitiven „Empfindung" und mit der Kontraktionsbewegung verbunden ist, oder es könnten in demselben Protoplasmakomplex zwei verschiedene Erregungsprozesse nebeneinander gedacht werden. Wie dem aber auch sei, jedenfalls wird durch dieses psychophysische Problem die Erklärung der objektiv feststellbaren physischen Kontraktionsbewegung nicht berührt, wie schon S. 1071f. ausgesprochen worden ist.

Literatur. ***M. Verworn,*** *Allgemeine Physiologie, 5. Aufl. Jena 1909.* — ***W. Pfeffer,*** *Pflanzenphysiologie, Bd. 2. Leipzig 1904.* — ***W. Biedermann,*** *Vergleichende Physiologie der irritablen Substanzen. In Ergebnisse der Physiologie, Bd. 8, Jahrgang 1909.* — ***P. Jensen,*** *Protoplasmabewegung. In Ergebnisse der Physiologie, Bd. 1. Wiesbaden 1902.* — ***L. Szymonowicz und R. Krause,*** *Lehrbuch der Histologie, 2. Aufl. Würzburg 1909.* — ***M. v. Frey,*** *Allgemeine Physiologie der quergestreiften Muskeln. In Nagels Handbuch der Physiologie, Bd. 4. Braunschweig 1909.* — ***R. du Bois-Reymond,***

Allgemeine Physiologie der glatten Muskeln. Ebenda. — **Th. W. Engelmann,** *Die Protoplasmabewegung, in Hermanns Handbuch der Physiologie, Bd. 1. Leipzig 1879.* — **L. Rhumbler,** *Die Foraminiferen der Plankton-Expedition, 1. Teil. Kiel 1911 (Literatur).* — **Th. W. Engelmann,** *Flimmerbewegung, in Hermanns Handbuch der Physiologie, Bd. 1. Leipzig 1879.* — **A. Pütter,** *Die Flimmerbewegung. In Ergebnisse der Physiologie. Jahrgang 2. Wiesbaden 1904.* — **H. Erhard,** *Studien über Flimmerzellen. In Archiv für Zellforschung, Bd. 4. Leipzig 1910.*

P. Jensen.

Bewegung.

Spezielle Physiologie der Bewegung mit Ausschluß des „Tierflugs".

1. Begriff und Einteilung. 2. Allgemeine organische Mechanik: a) Protoplasmabewegung. b) Flimmerbewegung. c) Muskelbewegung: α) Mechanik des Gerüstes. β) Muskelmechanik. 3. Spezielle Mechanik der Ortsbewegungen: a) Protozoen. b) Medusen. c) Echinodermen. d) Würmer. e) Gliedertiere. f) Weichtiere. g) Fische. h) Amphibien und Reptilien. i) Vögel. k) Vierfüßer. l) Stehen des Menschen. m) Gehen und Laufen des Menschen.

1. Begriff und Einteilung der Bewegungsphysiologie. Die Bewegungen der Tiere stellen der Forschung zwei Aufgaben. Erstens die, das Wesen der Bewegungskräfte zu ergründen, zweitens die, die mechanische Wirkung dieser Kräfte im einzelnen kennen zu lernen. Die erste Aufgabe fällt der allgemeinen, die zweite der speziellen Bewegungsphysiologie zu. Die spezielle Bewegungslehre ist also eine Mechanik der tierischen Bewegungen. Sie läßt sich zweckmäßig weiter einteilen in allgemeine organische Mechanik, die die Mechanik der Bewegungen im allgemeinen, und spezielle organische Mechanik, die die Mechanik einzelner Bewegungen, insbesondere der Ortsbewegung der Tiere behandelt.

2. Allgemeine organische Mechanik. Die Beobachtungen an der Gesamtheit aller Tiere lehren, daß die Bewegungskräfte in drei Hauptformen auftreten, als Protoplasmabewegung, Flimmerbewegung und Muskelbewegung.

2a) Die Protoplasmabewegung erscheint als eine Strömung festweicher Masse in beliebigen Richtungen, bei der keinerlei in bestimmten Formen wirkende Kräfte erkennbar sind. Sie ist daher der mechanischen Betrachtung unzugänglich, es sei denn, daß über Sitz und Ursache der bewegenden Kräfte bestimmte Annahmen gemacht würden, die indessen nach dem heutigen Stande der Forschung nur hypothetische sein könnten.

2b) Die Flimmerbewegung dagegen zeigt eine sehr deutlich ausgeprägte Form, die sogar als Grundbeispiel für die mechanische Betrachtung der höherentwickelten Bewegungsorgane dienen kann. Die Flimmerbewegung besteht darin, daß feine Anhänge des Tier- und Zelleibes, die meist die Form von gekrümmten Wimpern oder Borsten haben, aber auch in anderen Formen auftreten können, schnelle und kräftige Krümmungen ausführen.

Die Krümmung eines beliebigen Körpers (Fig. 1 K) ist mechanisch stets darauf zurückzuführen, daß an einer Seite (A der Figur) eine relative Verkürzung, an der anderen B der Figur eine relative Verlängerung stattfindet, während in der Mitte eine Tren-

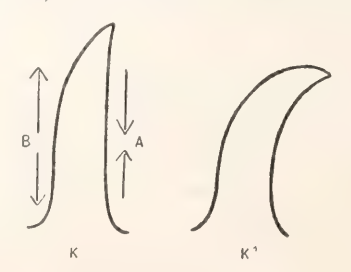


Fig. 1. Schema der Bewegung von Pseudopodien und Cilien. A Kontraktionskraft; B Gegenkraft.

nungsfläche, die neutrale Zone, unverändert bleibt. Dabei ist gleichgültig, ob die wirksamen Kräfte Expansionskräfte sind, die auf der einen (B) Seite wirken, oder Kontraktionskräfte, die auf der anderen (A) wirken. Es kommt eben nur auf die relative Zustandsänderung an. In der organischen Welt ist der zweite Fall der häufigere. Dann wirken auf jeden Abschnitt des Körpers, der sich krümmt, zwei Kräfte, die ein Kräftepaar bilden, nämlich auf der einen Seite die Kontraktionskraft, auf der anderen Seite eine elastische Gegenkraft. Unter dem Einfluß eines Kräftepaares erfolgt eine Drehung jedes Abschnittes, und die Gesamtwirkung dieser Drehungen ist die Krümmung des ganzen Körpers (K¹). In diesem Sinne denkt man sich die flimmernden Cilien als aus einer kontraktilen und einer elastischen Lamelle bestehend. Diese Teilung der flimmernden Organe ist nicht als anatomisch feststehend gemeint, sondern gilt nur für die im Augenblick vorliegende Bewegungsform, denn die Flimmerorgane können ihre Krümmungsrichtung wechseln.

Findet die Kontraktion nicht der ganzen Länge der Cilie nach auf einer Seite statt, sondern in einer um die Längsachse der Zilie gewundenen Linie, so entsteht eine schraubenförmige Krümmung, wie dies am

Stiel der Vorticellen, bei den Geißeln von Flagellaten u. a. zu beobachten ist.

Die gleiche mechanische Betrachtung gilt für die Bewegungen der Würmer, und für die des Rüssels und der Zunge vieler Tiere, insofern man von den anatomischen Einzelheiten absehen und nur die Wirkungsweise der Kräfte ins Auge fassen will.

Eine verwickeltere Gestalt nimmt die Flimmerbewegung da an, wo es sich um Flimmerorgane mit Flossensaum handelt, wie bei manchen Spermatozoen, bei Trypanosoma u. a. Die Mechanik ist dann dieselbe wie beim Flossensaum der Fische (s. S. 1087).

2c) Muskelbewegung. Die Bewegungen der höher entwickelten Tierarten kommen im allgemeinen auf dieselbe Weise zustande, nur daß die Teile, die die Kontraktion ausführen, und die, deren Festigkeit die Gegenkraft liefert, jeder als besonderes Organ, Muskel und Skelett, ausgebildet sind. Aus der Form des Skeletts und der Lage der Muskeln zum Skelett ergeben sich dann bestimmte mechanische Bedingungen, von denen die Form der Bewegung abhängt.

α) Mechanik des Gerüstes. Das Skelett erscheint im gesamten Tierreich in zwei Formen, die man als äußeres und inneres Skelett unterscheidet. Am besten ausgeprägt ist das äußere Skelett im Tierkreis der Arthropoden, in der Form des Chitinpanzers der Insekten und Crustaceen, das innere Skelett bei den Wirbeltieren, als Knochengerüst.

Das äußere Skelett, die Chitinhaut, gibt als röhrenförmige Umhüllung den einzelnen Abschnitten des Körpers Steifigkeit. Zwischen den einzelnen Abschnitten ist sie so dünn, daß sie schmiegsam ist, und meist in Form einer Falte eingestülpt, so daß ein Gliedabschnitt aus dem anderen fernrohr- oder schachtelhalmartig hervorsteht (Fig. 2). Verläuft eine solche dünne Falte rings um einen mit Chitin bekleideten Körperteil, so bildet sie durch ihre Biegsamkeit ein nach allen Seiten bewegliches Gelenk.

Häufig ist nun die Gelenkfalte nicht ringsum gleichartig ausgebildet, sondern an einer Seite tief, an der entgegengesetzten verstrichen. Dadurch wird die Beweglichkeit auf Knickung nach einer Seite beschränkt.

Dadurch, daß der schmiegsame Teil große Freiheit läßt, während von den festen Teilen aus Vorsprünge mannigfacher Gestalt ineinander greifen, werden eine große Zahl verschiedener Gelenkformen mit entsprechenden Bewegungsformen gebildet.

Bei den Wirbeltieren, wo ein inneres Knochengerüst besteht, wird die Gestalt der Bewegungsorgane und die Form der Bewegung ebenfalls zum Teil durch den Bau des Skeletts bedingt. Die einzelnen Abschnitte des Körpers erhalten durch die Knochen Steifigkeit, und ihre Bewegungen sind bestimmt durch die Beweglichkeit der Knochen in ihren Gelenkverbindungen untereinander.

Die Beweglichkeit der Knochen in den Gelenken hängt ab von der Verbindung durch Weichteile, und von der Gestalt der Berührungsflächen.

Die Theorie dieser Abhängigkeit läßt sich rein theoretisch entwickeln, und fällt ins Gebiet der Kinematik.

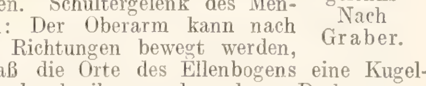
Man hat früher die Gelenklehre fast ausschließlich aus diesem Gesichtspunkte behandelt, und die Gelenke nach der Flächenform einzuteilen gesucht.

Dies stößt auf die Schwierigkeit, daß Gelenke von gleicher Flächenform je nach der Anordnung der Weichteile, verschiedene Grade von Bewegungsfreiheit haben können. Man tut also besser, in der Lehre von den Bewegungen den Bau der Gelenke außer acht zu lassen, und die Gelenke nur nach dem Grade ihrer Bewegungsfreiheit zu beurteilen.

Man hat zu unterscheiden zwischen Gelenken vom ersten, zweiten und dritten Grade der Freiheit, je nachdem der Endpunkt des bewegten Gliedes sich nur auf einer Linie bewegt, oder auf einer Fläche, oder neben der Bewegung auf der Fläche auch noch Drehungen (Rotation) ausführen kann.


Fig. 2. Schema des einfachen Chitingelenks Nach Graber.

Beispiele hierfür sind: Ellenbogengelenk des Menschen: bei feststehendem Oberarm kann die Hand sich nur im Kreisbogen mit dem Unterarm als Radius bewegen. Handgelenk des Menschen: Die Hand kann auf einem Stück Kugelschale um das Handgelenk als Mittelpunkt umherbewegt werden. Schultergelenk des Menschen: Der Oberarm kann nach allen Richtungen bewegt werden, so daß die Orte des Ellenbogens eine Kugelschale beschreiben, und es kann Drehung um die Längsachse, Rotation, stattfinden.



Für die mechanische Betrachtung wird in vielen Fällen von der tatsächlich vorhandenen Bewegungsfreiheit abgesehen werden können, wenn nämlich für die untersuchte Bewegung nur ein Teil der vorhandenen Freiheit ausgenutzt wird. So kommt z. B. für die Bewegung des Hüftgelenks beim Gehen, obgleich im Hüftgelenk drei Grade der Bewegungsfreiheit bestehen, im wesentlichen nur Bewegung um die Querachse, also Bewegungsfreiheit vom ersten Grade in Betracht.

β) Muskelmechanik. Ohne Gerüst. Der Bau der Muskeln bringt es mit sich, daß sie nur durch ihre Kontraktion als Zugstränge wirken. Die gleichzeitig stattfindende Verdickung ist zwar mechanischer Wirkungen fähig, kommt aber nur unter ganz besonderen Verhältnissen in Betracht. Da-

gegen kann die Zugkraft, die die Enden des Muskels bei seiner Zusammenziehung ausüben, im Organismus auf mannigfache Weise verwertet werden.

Zunächst ist darauf hinzuweisen, daß ganz aus Weichteilen gebildete Organe, wie der Fuß der Muscheln, oder Rüssel, Lippen und Zunge, die in verschiedenen Richtungen von Muskelsträngen durchzogen sind, einer vielseitigen Bewegung nach den oben angegebenen Grundsätzen fähig sind (vgl. Fig. 1). Je nachdem die Kontraktionskraft an einer oder der anderen Seite wirkt, und hier eine Verkürzung hervorbringt, entsteht eine elastische Gegenkraft, die mit der Kontraktionskraft zusammen als ein Kräftepaar drehend auf die Weichteilmasse einwirkt.

Besonders zu erwähnen ist ein Fall, der für die Bewegung der menschlichen Zunge in Betracht kommt. Durch Zusammenziehung von Muskelfasern, die quer zur Längsachse der Zunge verlaufen, kann eine Verlängerung der ganzen Masse erreicht werden. Tritt eine solche Zusammenziehung einseitig auf, so entsteht eine einseitige Verlängerung, die dazu führt, daß die Zungenspitze nach der entgegengesetzten Seite gekrümmt wird.

Ferner können die Muskeln, indem sie in flächenhafter Anordnung Hohlorgane umspannen, durch ihre Zusammenziehung einen Druck auf den Inhalt der Hohlorgane ausüben.

In beiden Fällen handelt es sich nur scheinbar um eine Druckwirkung durch die Muskeln, da stets die Verkürzung der Muskelfasern in ihrer Längsrichtung, also Zug, der Wirkung zugrunde liegt.

Die Bewegung ausschließlich aus Weichteilen bestehender Körperteile bildet bei den Wirbeltieren nur einen Ausnahmefall. Weitaus die meisten und stärksten Muskelbewegungen kommen durch das Zusammenwirken der Kontraktionskraft der Muskeln und der Widerstandskraft des Knochengerüsts zustande.

Mechanik der Skelettmuskeln. Sind zwei Knochen durch ein Gelenk miteinander verbunden, und es geht ein Muskel von einem Knochen zum anderen, so bringt die Zusammenziehung des Muskels eine Bewegung beider Knochen gegeneinander hervor.

Man hat bis vor einigen Jahren nur den Fall erwogen, daß der eine der beiden Knochen im Raume unbeweglich gedacht wurde. Die hergebrachte anatomische Darstellung, nach der die Muskeln am Rumpf ihren „Ursprung", an den Gliedmaßen ihren „Ansatz" haben, ließ keine andere Vorstellung aufkommen, als die, daß die Gliedmaßen von dem unbewegt gedachten Rumpf aus bewegt würden. Bei vielen Bewegungen ist aber das Entgegengesetzte der Fall.

Zu richtigen Anschauungen auf dem Gebiete der Muskelmechanik kann man nur gelangen, indem man die tatsächliche Wirkungsweise der Muskeln ins Auge faßt, nämlich die einer Kontraktionskraft, die genau so stark am Ursprung wie am Ansatz des Muskels zieht.

Wenn also (Fig. 3) zwischen zwei gelenkig verbundenen Knochen (AG und BG) ein Muskelstrang angespannt ist, und sich zusammenzieht, kann man seine Wirkung in zwei Kräfte (Ma, Mb) zerlegt denken, die einander

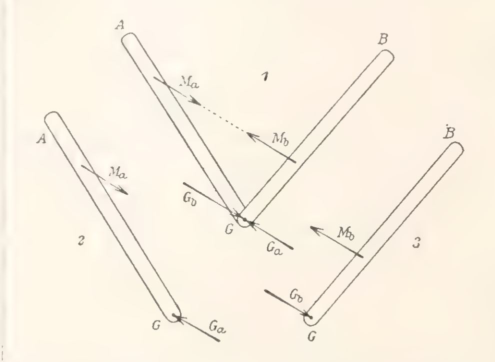


Fig. 3. Wirkung eines eingelenkigen Muskels zwischen zwei Knochen. 1. Der Zug des Muskels M ist in zwei Kräfte Ma und Mb zerlegt, die im Gelenke G zwei Gegenkräfte Ga und Gb hervorrufen. In 2. und 3. ist die Wirkung der Kräftepaare aus Muskel- und Gegenkraft auf die einzelnen Knochen dargestellt.

genau gleich sind, und deren eine am Ursprunge, die andere am Ansatz in der Richtung des Muskelstranges zieht. Für die Richtung des Muskels ist, falls etwa der Muskelstrang über Knochenvorsprünge um die Ecke verläuft, der Teil maßgebend, der frei von einem Knochen zum anderen gespannt ist. Auf die beiden Knochen wirkt demnach der Muskel mit zwei gleichen, ~~gleich~~ aber entgegengesetzt gerichteten Kräften ein. Jede dieser Kräfte würde für sich allein den ganzen Knochen in ihrer Richtung fortbewegen. Da aber die beiden Knochen im Gelenk G verbunden sind, kann diese entgegengesetzte Bewegung beider Knochen nicht stattfinden, sondern die beiden Knochen werden im Gelenk gegeneinander gedrückt, und zwar mit einer Kraft, die genau den beiden Teilen der Kontraktionskraft entspricht. Dieser Druck der beiden Knochen gegeneinander wirkt so, als seien im Gelenk zwei Gegenkräfte (Ga und Gb) wirksam, von der Größe, daß sie den Zugkräften gerade gleich sind. Demnach wirken auf jeden der beiden Knochen zwei Einzelkräfte ein, erstens die Zugkraft des einen Muskelendes, zweitens die Druckkraft im Gelenk, die der ersten gleich parallel und entgegengesetzt ist. Beide Kräfte bilden mithin ein Kräftepaar, das den Knochen dreht.

Sind die beiden Knochen einander gleich, so werden beide, da nach dem obigen genau gleiche Kräftepaare auf sie wirken, mit

genau gleicher Kraft, also auch in gleichem Maße gedreht werden (Fig. 4 AA_1 und BB_1). Bietet der eine, etwa weil er schwerer ist, der Bewegung größeren Widerstand, so wird die Drehung sich auf beide Knochen im umgekehrten Verhältnis des Widerstandes verteilen, oder, was auf dasselbe hinausläuft, sofern keine anderen Kräfte auf die beiden bewegten Massen einwirken, werden sie sich so bewegen, daß ihr Gesamtschwerpunkt (S) dabei auf derselben Stelle bleibt.

Der hier betrachtete Fall, daß an einem Gliede, das aus mehreren gelenkig verbundenen Abschnitten besteht, nur ein einziger

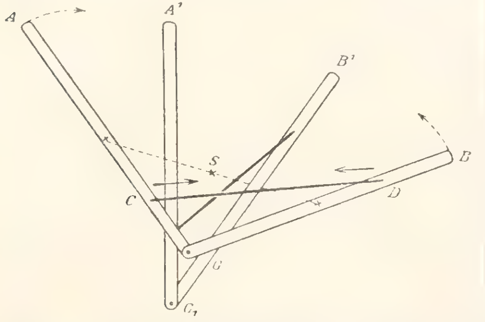


Fig. 4. Durch die Kontraktion eines Muskels CD werden beide Knochen AG und BG in gleichem Maße gedreht, so daß sie die Stellung A′G′B′ einnehmen. Der Gesamtschwerpunkt S behält seine Lage bei.

zwischen zwei benachbarten Abschnitten wirkender Muskel sich zusammenzieht, und zugleich auf die übrigen Gelenke einwirkt, ist ~~nun~~ nur angenommen worden, um die mechanische Abhängigkeit der Bewegungen der einzelnen Abschnitte eines Gliedes voneinander deutlich zu machen. In Wirklichkeit werden diese Bewegungen so ausgeführt, daß alle Muskeln, die der betreffenden Bewegung förderlich sein können, in Tätigkeit treten, und einander gegenseitig unterstützen.

Nach der obigen Darstellung werden z. B. bei Streckung des Kniegelenkes durch einen zwischen Oberschenkel und Unterschenkel verlaufenden Muskel Oberschenkel und Unterschenkel beide in Bewegung gesetzt, so daß der Unterschenkel im Knie, und der Oberschenkel im Hüftgelenk eine Streckbewegung macht. In Wirklichkeit, wenn es sich etwa darum handelt, den Körper aus der Hockstellung zum Geradestehen zu bringen, wird die Bewegung des Oberschenkels durchaus nicht etwa dem Kniestrecker allein überlassen, sondern es wirken die vom Becken zum Oberschenkel ziehenden Muskeln kräftig mit. Jede, auch die scheinbar einfachste Körperbewegung ist somit das Ergebnis der geordneten Zusammenwirkung, **Koordination**, zahlreicher Muskeln (Fig. 5).

In dem Falle, daß nicht nur zwei, sondern drei oder mehr gelenkig verbundene Körperteile gegeneinander bewegt werden, und daß an ihnen Muskeln wirken, die nicht nur von einem zum benachbarten, sondern über meh-

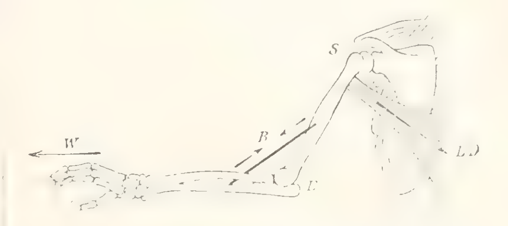


Fig. 5. Koordination zweier Muskelgruppen. Um gegen den Widerstand W einen kräftigen Zug auszuüben, arbeitet der Latissimus dorsi LD zugleich mit den Ellenbogenbeugern B, so daß im Schulterpunkt S und im Ellenbogen E gleichzeitig aktive Beugung eintritt.

rere Abschnitte hinweg verlaufen, wird die mechanische Betrachtung sehr schwierig. Um unter solchen Bedingungen die Wirkung des Muskelzuges vorausbestimmen zu können, hat Otto Fischer neue mechanische Lehrsätze aufgestellt und besondere Methoden ausgearbeitet.

Das Endziel dieser Untersuchungen ist, zu bestimmen, welche Bewegungen bei gegebenen Muskelzusammenziehungen erfolgen müssen, und umgekehrt, aus einer gegebenen Bewegung auf die Muskeltätigkeit zurückschließen zu können.

Die zweite Aufgabe ist von Otto Fischer in jahrelanger Arbeit für die Gehbewegungen des Menschen zum Teil gelöst worden. Die Methodik dieser Untersuchung mag hier als Muster der Forschung auf dem Gebiet der speziellen Bewegungslehre kurz geschildert werden. Durch photographische Aufnahme von drei Punkten aus, und Ausmessen der Bilder wurde zunächst die Form der Bewegung genau festgestellt, und in Koordinatenmaßen ausgedrückt. Durch Messungen, Wägungen und Schwerpunktsbestimmungen an vier gefrorenen Kadavern wurden die Gewichte und die Lage des Schwerpunktes der verschiedenen gegeneinander beweglichen Teile des Körpers einzeln bestimmt. Aus diesen Bestimmungen konnten unter Berücksichtigung des Zusammenhangs der Gliedmaßen untereinander die Kräfte berechnet werden, die erforderlich sind, um jeden einzelnen Körperteil zu den Bewegungen zu bringen, die er beim Gange tatsächlich ausführt. Diese Kräfte gehören vier Gruppen an: 1. Schwere. 2. Aeußerer Widerstand am Boden. 3. Lebendige Kraft der in Bewegung befindlichen Massen. 4. Muskelkräfte. Die ersten drei lassen sich aus den gegebenen Verhältnissen ausrechnen, und wenn ihre Beträge von den vorher festgestellten Gesamtkräften abgezogen werden, erhält man die Größe der wirksamen Muskelkräfte. Damit ist

die Leistung einzelner Muskelgruppen, zum Beispiel der Beuger und Strecker jedes einzelnen Gelenks festgestellt. Man kann annehmen, daß sich diese Leistung auf die einzelnen Muskeln nach dem Maße ihrer Kraft, d. h. der Stärke ihres Zuges unter Berücksichtigung der Angriffsweise, verteilt.

Auf diese Weise kann also die Mechanik der Bewegungen eines Organismus bis ins einzelne aufgeklärt werden.

In bezug auf die Anwendung der besprochenen mechanischen Betrachtungen auf die tatsächliche Wirkungsweise wirklicher Muskeln ist folgendes zu beachten: Bei der allgemeinen mechanischen Betrachtung werden die Knochen unter dem Bilde gerader Linien, die Gelenke als mathematische Punkte, die Muskeln als lineare Zugkräfte behandelt. In Wirklichkeit sind die Drehpunkte der Gelenke oft veränderlich, die Knochen haben oft Vorsprünge, an denen die Muskeln angreifen, die Muskeln selbst sind dick und breit, so daß sich eine bestimmte Zugrichtung nicht angeben läßt, die Sehne gleitet mitunter über Knochenvorsprünge, so daß sich ihre Richtung ändert, die Zugkraft des Muskels ist vom Grade der Verkürzung abhängig.

Ferner ist in fast allen praktischen Fällen damit zu rechnen, daß nicht ein Muskel, sondern deren mehrere zugleich wirken, deren auf die Bewegung einwirkende Momente summiert werden müssen.

Der mechanisch-theoretischen Untersuchung steht das einfache empirische Ausprobieren der Tätigkeit der Muskeln bei bestimmten Bewegungen gegenüber, das insbesondere Duchenne durch seine Methode isolierter elektrischer Reizung ausgebildet hat.

3. Spezielle Mechanik der Ortsbewegungen.

Da die Mannigfaltigkeit der Bewegungen eines tierischen Körpers unendlich ist, ist es üblich, die spezielle Physiologie der Bewegungen auf die Lehre von den Ortsbewegungen einzuschränken. Dies ist auch dadurch gerechtfertigt, daß diese Bewegungen durch ihre Häufigkeit und Regelmäßigkeit die Entwickelung des ganzen Organismus beeinflussen.

3a) Protozoen. Ebenso wie die allgemeine Mechanik der Protoplasmabewegung ist auch die Mechanik der Ortsbewegung der als bloße Protoplasmamassen erscheinenden Amöben noch nicht aufgeklärt.

Die Bewegung erscheint als ein Fließen der festweichen Masse in bestimmter Richtung. Notwendig ist hierzu ein gewisser Reibungswiderstand der Fläche auf der die Ortsbewegung stattfindet, sei es am Grunde unter Wasser oder auf trockenem Boden.

Nach einigen Angaben handelt es sich bei der Strömung um einen regelmäßigen Kreislauf, indem die an der Bodenfläche befindlichen Teile der Bewegungsrichtung entgegenströmen und auf der oberen Fläche des Körpers zurückkehren, so daß die ganze Masse sich gleichsam vorwärts wälzt (Fig. 6).

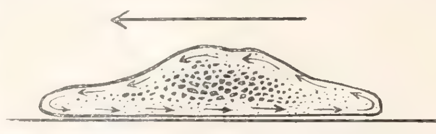


Fig. 6. Kriechende Amöbe nach Jennings. Indem das Protoplasma im Sinne der kleinen Pfeile im Kreise strömt, wälzt sich die ganze Körpermasse in der Richtung des großen Pfeiles.

Diese Bewegungsweise würde der von Otto Müller an Diatomeen beobachteten Fortbewegung durch Ströme vorn ausgestoßener und hinten wieder eingezogener Masse ähneln.

Eine besondere Form der Ortsbewegung besteht darin, daß die Protoplasmamasse einen Ausläufer, ein „Pseudopodium“, in der Richtung der Bewegung ausstreckt, mit der Spitze dieses Ausläufers festhaftet, und den übrigen Körper nachzieht. Das Haften wird durch bloße Adhäsion erklärt, da klebriges Sekret nicht erkennbar ist.

Difflugia soll mit zwei Pseudopodien, die abwechselnd ausgestreckt werden, geradezu Schreitbewegungen machen.

Eine sehr merkwürdige Bewegungsweise zeigen manche Protozoen, wie z. B. Arcella, indem sie ohne Bewegung im Wasser auf- und absteigen. Dies wird auf eine Aenderung des spezifischen Gewichts zurückgeführt, die dadurch entsteht, daß entweder Gasblasen im Innern der Protoplasmamasse gebildet werden, oder andere stoffliche Aenderungen eintreten, durch die das spezifische Gewicht vermindert wird, wie z. B. Ausscheidung von Oeltröpfchen.

Die Infusorien bewegen sich ausschließlich im Wasser durch Flimmerbewegung.

Bei den Ciliaten, deren Wimperbesatz ruderartig periodische Schläge ausführt, ist die mechanische Ursache der Fortbewegung darin zu suchen, daß die Flüssigkeit einer schnellen Bewegung unverhältnismäßig stärkeren Widerstand entgegensetzt, als einer langsamen. Abgesehen von der Form der Cilien, die in vielen Fällen beim wirksamen Schlage gestreckter ist, als beim Ausholen, ist also die Schnelligkeit des Schlages für die Richtung des größeren Widerstandes maßgebend.

Damit hängt zusammen, daß die wirksame Richtung des Schlages auch umgekehrt werden kann.

Die Richtung der Bewegung ist bei manchen Infusorien anscheinend völlig willkürlich, bei anderen durch die Stellung der Flimmerorgane vorbestimmt. Bei diesen

nimmt die Bewegung eine schraubenförmige Richtung, indem die Bahn gekrümmt ist, und gleichzeitig eine Drehung des Tieres um die Richtung der Bewegung stattfindet. Dies ist als ein besonders zweckmäßiger Kunstgriff dargestellt worden, durch den die Bewegung statt eines endlosen Kreisens am Ort in eine fortschreitende Bewegung umgewandelt wird. Es ist aber zu bemerken, daß die schraubenförmige Gestalt der Bahn sich bei der Fortbewegung jedes Körpers ergeben muß, der nicht durch völlig symmetrische Form eine gerade Richtung einhält.

Bei den Flagellaten nimmt die Bewegung verschiedene Formen an. Die Flimmerorgane sind mannigfacher Bewegungen fähig, nämlich einfacher oder doppelter Krümmung, die auch als schraubenförmige Windung bezeichnet werden kann, Schlängelung und Flossensaumbewegung. Die letztgenannten Formen entsprechen mechanisch der Bewegung der Schlangen und aalartigen Fische (s. S. 1066).

Die Geißelbewegung ist gleich wirksam, wenn die Geißel im Sinne der Bewegung nach vorn gerichtet ist, und wenn sie nach hinten gerichtet ist. Der erste Fall soll häufiger sein.

Als besondere Formen der Bewegung von Flagellaten sind Schreit- und Sprungbewegungen der mit Cirren ausgerüsteten Arten Trichomonas und Stylonychia zu erwähnen.

Die Bewegung der mit Geißeln ausgerüsteten Bazillen ist der der Infusorien mechanisch gleich zu achten. Auffällig ist die Eigenschaft mancher Bakterien, wie Bacillus subtilis, sich zu Ketten aneinanderreihen und mit gemeinsamen Schlängelbewegungen zu schwimmen. Dies gewährt mechanisch den doppelten Vorteil geringeren Stirnwiderstandes und größerer Antriebskraft.

3b) Medusen. Von den Medusen ist bei Hydra Kriechen mittelst der Tentakeln beobachtet worden. Die freischwimmenden Quallen rudern durch Zusammenziehungen der unter dem Gallertschirm gelegenen Muskelplatte, und zwar sehr geschickt in beliebiger Richtung, mitunter sogar mit der Höhlung der Glocke nach oben, so daß sie sich nach unten bewegen. Ueber die Koordination der einzelnen Abschnitte zu dieser Bewegung sind zahlreiche Untersuchungen gemacht worden.

Bei den Ktenophoren finden sich sogenannte „Wimperfurchen" in denen flimmernde Organe von Blättchenform angeordnet sind, die den ganzen Körper im Wasser umher bewegen.

Die Siphonophoren treiben mit Hilfe mit Gas gefüllter Blasen an der Oberfläche. Physalia, die auf dem Schwimmkörper einen hochragenden Kamm trägt, wird geradezu als Segler bezeichnet.

3c) Echinodermen. Von den Seesternen sind die Asteriden auf langsames Kriechen mit ihren als Ambulakralfüßchen bezeichneten Bewegungsorganen angewiesen. Diese bestehen aus kontraktilen röhrenförmigen Anhängen der im Innern verlaufenden Ambulakralkanäle. An der Ursprungsstelle jedes Ambulakralfüßchens befindet sich eine kontraktile Blase, die ihren Inhalt in das Füßchen treiben und es ausdehnen kann. Am Ende des Füßchens befindet sich meist eine Saugscheibe. Durch die Kontraktilität der Röhrenwandung ist das Füßchen allseitiger Bewegung fähig. Diese Organe, die zu Hunderten in verschiedenartiger Anordnung auf der Körperfläche verbreitet sind, werden in beliebiger Richtung ausgestreckt, angeheftet, und ziehen den Körper nach. Inzwischen strecken sich andere Füßchen aus, werden ein Stück weiter angeheftet und so fort.

Die Schlangensterne sind durch ihre langen Arme zu einer viel schnelleren sprungartigen Bewegung befähigt. Sie werfen einen oder zwei Arme voran, heften sie fest, und schleudern den ganzen Körper über die Anheftungsstelle hinaus. Die Seeigel benutzen außer ihren Ambulakralfüßchen auch die Stacheln zu einer Art Schreitbewegung.

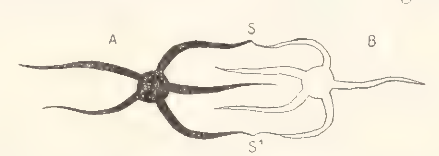


Fig. 7. Fortbewegung der Schlangensterne. Nach Oestergren. Mit den Spitzen der Arme S und S_1 festgeheftet, schleudert sich der Schlangenstern aus der Stellung A in die Stellung B.

3d) Würmer. Bei den Würmern bildet die Muskulatur im wesentlichen den sogenannten Hautmuskelschlauch, der aus einer Längs- und einer Ringfaserschicht besteht, die den ganzen Körper überziehen. Dadurch vermag der Körper sich ganz oder teilweise zu verlängern und zu verkürzen oder auch alle möglichen Krümmungen auszuführen. Die Ortsbewegung auf festem Boden geht so vor sich, daß ein Teil des Körpers vom Boden abgehoben und gestreckt wird, so daß sein vorderer Teil weiter vorn wieder auf den Boden gelegt werden kann. Dieser dient dann als Stützpunkt, während der hintere Teil sich zusammenzieht, und das Hinterteil des Körpers mitschleppt. Diese Bewegungsweise kann weiter ausgebildet werden, indem die Verlängerung und Vorschiebung mit nachfolgender Verkürzung

nach Art einer gleichförmigen Welle den Körper durchläuft, wobei eine koordinierte rhythmische Innervation der Muskeln anzunehmen ist, über deren Zusammenhang mit dem Bau des Nervensystems mehrere Untersuchungen angestellt worden sind. Eine zweite Ausbildungsform findet sich bei den Blutegeln ausgeprägt, die am Hinter- und Vorderende mit Haftorganen ausgestattet sind. Das Haften des Hinterendes soll nur durch Sekret, nicht durch Ansaugen bedingt sein, da die Egel auch auf Drahtgitter kriechen können. Das Kriechen besteht darin, daß das Vorderende festgeheftet, der ganze Körper zusammengezogen und das Hinterende dicht am Vorderende von neuem angeheftet wird, worauf sich der ganze Körper streckt, und das Vorderende von neuem festgeheftet wird. Es entsteht auf diese Weise eine Art Schreitbewegung, die schnell fördert.

Bei den Oligochäten, wie beim Regenwurm, sind die Borsten, die an der Bauchfläche jedes Segmentes stehen, an der Bewegung beteiligt, nach einer Angabe sogar mit aktiver Einzelbewegung.

Im Wasser schwimmen die Polychäten mit Beteiligung ihrer Borstenbüschel, die Egel durch Schlängelung in senkrechter Ebene.

Die Rotiferen sind in mechanischer Beziehung den Infusorien anzureihen, da sie, sofern sie sich überhaupt frei bewegen, nur durch ihren Wimpersaum umhergetrieben werden, wobei sie im allgemeinen eine schraubenförmige Bahn beschreiben.

3e) Gliedertiere. Bei den Arthropoden ist für die Bewegungsmechanik ein weites Feld, da ihr stark gegliedertes Körpergerüst die mannigfaltigsten Formen zeigt. Sie bewegen sich laufend, kletternd, schwimmend und fliegend.

Die Crustaceen sind in bezug auf die Ortsbewegung in Natantia und Reptantia eingeteilt worden. Die Schwimmbewegungen der Crustaceen zerfallen in zwei Formen: Bewegung durch Rudern mit den Extremitäten, und Bewegung durch Schwanzschläge.

Die Ruderbewegung ist bei den Branchiopoden, insbesondere bei Apus, eine regelmäßige Wellenbewegung der zahlreichen Fußpaare, die hier die Form von Ruderblättern haben. Bemerkenswert ist, daß Branchipus auf dem Rücken zu schwimmen pflegt.

Bei anderen Arten, wie beispielsweise Limulus, Penaeus, ist dieselbe Art der gleichförmigen Ruderbewegung mit allen Beinpaaren ausgebildet.

Dagegen schwimmen die Cladoceren, Copepoden und andere durch einzelne Schläge einzelner zu größeren Ruderarmen ausgebildeter Extremitäten.

Die dritte Bewegungsform findet sich beim Flußkrebs, beim Hummer und anderen, und besteht darin, daß der ganze Hinterleib mit ausgebreiteten Schwanzschildern als Ruder benutzt wird. Meist ist die Ruderbewegung eine Flexion, so daß der Körper dadurch rückwärts bewegt wird. Die Extremitäten werden passiv nach vorne gestreckt, um den Widerstand zu vermindern.

Beim Gehen auf dem Lande wird meist nur ein Teil der Extremitäten benutzt. Hummer und Flußkrebs brauchen vier Beinpaare, Palaemonetes nur drei. Ueber die Beinbewegungen beim Gange des Flußkrebses macht List, dem sich Bethe anschließt, Angaben, die nach Auffassung des Referenten unvereinbar sind. Sie dürften so zu verstehen sein, daß von vier Gehfüßen zuerst der erste einer Seite, zugleich mit dem dritten der anderen, dann der erste der anderen zugleich mit dem dritten der ersten Seite, und dann erst der zweite Gehfuß der ersten Seite zugleich mit dem vierten der Gegenseite vorschreitet. Das zweite Beinpaar greift dabei über das erste hinaus. Das dritte Beinpaar wirkt noch durch Zug, indem es sich festhakt, das vierte durch Schieben. Die Gelenkbewegungen der sämtlichen Beine hat List bis ins einzelne beschrieben.

Der Gang kann außerordentlich schnell fördern, wie besonders bei den Krabben, die sich dabei stets seitlich bewegen.

Bei den Amphipoden sind einzelne Beinpaare als Springbeine ausgebildet.

Von den Isopoden stehen in der Bewegungsweise die Onisciden den Myriapoden nahe. Die Folge der Beinbewegungen ist nicht näher untersucht.

Die Myriapoden brauchen ihre zahlreichen Beinpaare so, daß die der einen Seite um ein wenig nach denen der anderen Seite vorschreiten, und die Beine jeder Seite von vorn nach hinten aufeinander folgen. Bei Julus dagegen werden beide Beine jedes Paares gleichzeitig bewegt. Außerdem machen die Myriapoden von der Schlängelung des ganzen Körpers Gebrauch.

Die Spinnen mit 8 Beinen zeigen eine Gangart, die nicht auf ein einfaches Schema zurückgeführt werden kann. Die beiden mittleren Füße einer Seite schreiten in regelmässiger Abwechselung vor. Während des Augenblicks, in dem beide auf dem Boden stehen, schreiten erstes und viertes Bein derselben Seite vor, aber wegen der größeren Länge des vierten Beines etwas ungleichförmig, das vierte bleibt länger tätig. Die Beine der anderen Seite machen die entgegengesetzt entsprechende Bewegung.

Die Insekten bewegen sich meist auf allen 6 Beinen, doch kommen Fälle vor, in denen die vordersten als Fangarme ausgebildet sind, so daß vierfüßige Bewegung nötig wird.

Bei den Laufkäfern werden die sechs Beine annähernd in zwei Gruppen zu je drei gebraucht, indem vorderes und hinteres Bein einer Seite mit dem mittleren Bein der anderen Seite zugleich tätig sind. Form und Bewegungsweise der einzelnen Beine ist bei den verschiedenen Arten wesentlich verschieden, und nur an einzelnen Arten genauer untersucht. Nach Graber findet die eigentliche Stützung durch das Tibiaende statt, während das Fußende nur mitschleppt.

Bei vielen Insekten, wie z. B. bei der Stubenfliege, sind Haftorgane ausgebildet, die oft als Saugscheiben gedeutet worden sind, richtiger aber als Klebscheiben zu bezeichnen sind. Echte Saugscheiben dagegen hat der männliche Wasserkäfer Dytiscus an den vorderen Beinen.

Einige Insektenarten vermögen auf der Wasseroberfläche zu laufen, indem sie von der kapillaren Depression, die um ihre unbenetzbaren Füsse oder am Rande des eintauchenden Körpers entsteht, getragen werden.

Die Schwimmkäfer sind durch ihren ganzen Bau an das Leben im Wasser angepaßt. Ihre beiden hinteren Beinpaare sind durch breite Borstensäume zu Rudern umgestaltet. Merkwürdigerweise sind die Angaben von Graber über die Schwimmbewegungen des Dytiscus und die von Bethe über die Schwimmbewegungen des Hydrophilus ganz verschieden. Dytiscus macht gleichseitige Schwimmstöße, während Hydrophilus die beiden Beinpaare ungleichseitig aber in entgegengesetztem Sinne bewegt, so daß das mittlere rechte und hinterste linke Bein gleichseitig einen Ruderschlag machen, dann das mittlere linke und hintere rechte.

Beim Gehen brauchen beide Arten die Beine wie andere Insekten nach dem Schema des doppelten Dreifußes (s. oben).

Das Kriechen der Raupen und Maden ist der Bewegungsweise der Würmer zu vergleichen, doch besteht große Mannigfaltigkeit der Bewegungen. Selbst nahestehende Arten zeigen verschiedenen Bewegungsmechanismus. So kriechen die Maden von Musca vomitoria wie Ringelwürmer, die von Eristalis tenax mit Hilfe von Fußwarzen. Bekannt ist die Bewegung der Spannerraupen, die sehr ausgeprägt die oben beim Blutegel beschriebene Form zeigt. Merkwürdig ist, daß viele in der Erde, im Holze und ähnlicher Umgebung lebende Maden, wie Engerlinge und Holzwürmer aller Art, fast gar keine Fähigkeit zu kräftigen Bewegungen zeigen, und sich doch ihre Wege bahnen können.

3f) Weichtiere. Die Mollusken und Molluscoïden bilden betreffend die Bewegungsweise nur zwei Gruppen, deren eine die Cephalopoden, deren andere die Schaltiere umfaßt.

Die Schaltiere haben zum größten Teil nur geringe Beweglichkeit, die auf Formänderungen ihres nur aus Weichteilen bestehenden Körpers, vor allem des Fußes der Muscheln oder der Sohle der Schnecken beruht. Bei den Muscheln kommt noch das Oeffnen und Schließen der Schale in Betracht. Das Gelenk zwischen den Schalen, das Muschelschloß, zeigt verschiedene bei manchen Arten hochentwickelte Formen. Es wird in der Regel durch ein elastisches Band in offener Stellung erhalten, und kann durch starke Schließmuskeln geschlossen werden.

Die Muscheln schieben sich am Grunde durch Streckbewegungen ihres muskulösen Fußes umher. Bei den Schnecken dagegen wird die äußere Form des Körpers während der Bewegung nicht merklich geändert, sondern gleitet auf seiner Sohlenfläche scheinbar ohne jede Bewegungsursache hin. Diese Bewegung hat die Aufmerksamkeit der Forscher vielfach beschäftigt, und wird auf eine geringfügige Wellenbewegung der Sohle zurückgeführt, die durch Zusammenziehungen ihrer eng verwobenen Muskelfasern entsteht. Die im Sinne der Ortsbewegung gesprochen von vorn nach hinten ablaufenden Wellen führen in derselben Weise wie die Kontraktionen des Körpers der Würmer oder die Kriechbewegungen der Schlangen eine Vorschiebung des ganzen Körpers herbei. Die Schleimsekretion, durch die die Sohlenfläche und häufig auch die Bodenfläche auf der die Schnecke kriecht, beständig mit einer Schleimschicht überzogen wird, spielt dabei eine fördernde Rolle.

Bemerkenswert ist, daß Wasserschnecken dieselbe Bewegungsform an der Oberfläche des Wassers ausführen, indem sie, mit dem Gehäuse nach unten im Wasser treibend, die Sohlenfläche an der Wasseroberfläche ausbreiten, und mitunter eine Schleimbahn hinter sich lassend, an ihr entlang gleiten.

Manche Muscheln und Schnecken vermögen im Wasser frei zu schwimmen. Insbesondere die Lungenschnecken, aber auch Kiemenschnecken haben die Fähigkeit, sich im Wasser aufsteigen zu lassen und willkürlich wieder unterzusinken. Dies beruht auf einer Aenderung des spezifischen Gewichts, deren Mechanismus noch unerklärt ist.

Schwimmbewegungen im Wasser führen manche Arten, wie Acera, Jantheria mit ihrem flügel- oder ruderartig geformten Fuße aus. Pecten braucht gewissermaßen die Schalen als Ruder, indem sie sie abwechselnd öffnet und kräftig schließt. Die Gestalt des Mantelrandes bringt es mit sich, daß beim Schluß der Schale das Wasser rückwärts, zu beiden Seiten des Schlosses entweicht, so daß der Rückstoß das ganze

Tier mit der Schalenöffnung voran durchs Wasser schleudert.

Unter den Cephalopoden hat Argonauta ebenfalls die Fähigkeit sich im Wasser nach Belieben steigen oder sinken zu lassen. Ueber das Rudern von Argonauta in ihrer Schale ist vielerlei berichtet worden, doch soll nach neueren Beobachtungen die Bewegungsweise der der anderen Cephalopoden ganz gleich sein.

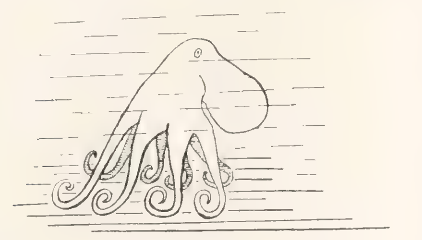


Fig. 8. Gehbewegung des Octopus am Grunde.

Die Cephalopoden bedienen sich ihrer Arme nur zum Kriechen auf dem Grunde, zum erfassen der Beute usf. Octopus soll auf seinen Füßen am Grunde geradezu einherschreiten (Fig. 8). Beim Schwimmen verhalten sich die Arme passiv. Der Antrieb wird durch den Wasserstrahl geliefert, der aus dem Mantelraume durch den Sipho ausgetrieben wird. Die Cephalopoden schwimmen also vermöge des Rückstoßes dieses Wasserstrahls, mit dem Hinterende des Leibes voran (Fig. 9).

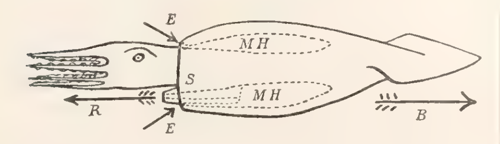


Fig. 9. Schwimmen der Cephalopoden durch Rückstoß. Aus der Mantelhöhle MH durch den Sipho S ausgestoßen entweicht Wasser in der Richtung R. Der Rückstoß treibt das Tier in der Richtung B. Bei Erschlaffung des Mantels tritt durch die Mantelspalte E neues Wasser in die Mantelhöhle.

Manteltiere. Einen ähnlichen Vorgang nimmt Seeliger für die Ortsbewegung von Pyrosoma in Wasser an. Im übrigen zeigen die Tunicaten nur im Larvenstadium lebhaftere Eigenbewegung durch Ruderanhänge, sind aber hauptsächlich auf passives Umhertreiben angewiesen.

3g) Fische. In statischer Beziehung ist über das Schwimmen der Fische zunächst zu bemerken, daß ihr spezifisches Gewicht im allgemeinen dem des Wassers gleich ist. Die Gewebe des Körpers mit Ausnahme des Fettes sind schwerer als Wasser, aber der Körper der meisten Fische enthält in der Schwimmblase eine Gasmenge, die die spezifische Schwere der übrigen Körpergewebe ausgleicht. Da der Wasserdruck mit der Tiefe zunimmt, kann diese Ausgleichung, falls die Schwimmblase nicht durch starre Wände der Einwirkung des Wasserdrucks entzogen ist, immer nur für eine bestimmte Wassertiefe gelten. Es wäre auch denkbar, daß die Muskulatur der Schwimmblasenwand oder des Körpers auf den Inhalt der Schwimmblase einen Druck ausübte, der den Rauminhalt der Schwimmblase nach Willkür einstellte. Dann könnte der Fisch um aufzusteigen, einfach den Druck mäßigen, um abzusinken, den Druck erhöhen, oder er könnte, indem er beim Aufsteigen den Druck erhöhte, beim Sinken ihn ermäßigte, sein spezifisches Gewicht stets dem des Wassers gleich halten. Zahlreiche verschiedene Versuche lehren aber, daß eine solche Regulierung durch Muskeltätigkeit nicht besteht.

Die Größe der Schwimmblase wird wohl nach experimenteller Störung des Gleichgewichts wiederhergestellt, aber nicht durch Muskeltätigkeit sondern durch Gassekretion oder Gasresorption. Bei den Fischen, deren Schwimmblase mit dem Darm durch einen Luftgang verbunden ist, kann man nach künstlicher Entleerung der Schwimmblase beobachten, daß sie Luft schlucken und in die Schwimmblase treiben.

Da keine schnellwirkende Einstellung der Schwimmblasengröße stattfindet, müssen die Fische beim Sinken ein immer höheres spezifisches Gewicht annehmen, beim Steigen ein immer geringeres, weil die Schwimmblase mit der Stärke des Wasserdrucks ihre Größe ändert. Es wird also für jeden gegebenen Fall eine bestimmte Tiefenlage geben, in der der Fisch sich am leichtesten auf und ab bewegen kann.

Seit man erkannt hat, daß die Schwimmblase nicht zum Auf- oder Absteigen gebraucht wird, sind viele Forscher geneigt, in ihr nur ein Respirationsorgan oder einen Orientierungsapparat zu sehen. Viele Arten Fische haben keine Schwimmblase, ohne daß sich ein Zusammenhang zwischen ihrer Bewegungsweise und dem Fehlen der Schwimmblase nachweisen ließe.

Ferner hat die Schwimmblase einen wesentlichen Einfluß auf die Stellung, die der Fischkörper im Wasser einnimmt. Da sie meist ziemlich weit ventralwärts gelegen ist, liegt der Schwerpunkt des Fischkörpers im allgemeinen über dem Schwerpunkt des Auftriebes, das heißt der Fischkörper ist für gewöhnlich in einer labilen Gleichgewichtslage, aus der er, sobald die steuernde Bewegung der Flossen aufhört, in die Stellung mit dem Bauch nach oben umschlägt.

In dynamischer Beziehung ist vor allem hervorzuheben, daß die Antriebskraft für die Ortsbewegung der Fische vorwiegend in den Ruderbewegungen des Schwanzes liegt.

Stellt man sich den Schwanz des Fisches als eine ebene starre Ruderfläche vor, die um eine am vorderen Rande gedachte senkrechte Achse pendelartig mit gleichförmiger Geschwindigkeit hin und herbewegt wird, so wird schon aus dieser Bewegung ein gewisser Antrieb nach vorn hervorgehen. Zwar geht jeder Schlag rückwärts, sobald die Mittelebene überschritten wird, in einen scheinbar vollkommen gleichwertigen Teil der Bewegung über, dessen Ruderwirkung nach vorn gerichtet ist, weil aber die Wirkung eines Ruderschlages am Anfang der Bewegung sehr viel stärker ist als am Ende, wird in der Gesamtwirkung der Teil vorwiegen, der der Wirkung des Ruders unmittelbar nach den beiden Umkehrpunkten entspricht. Daher wird die Rückwärtswirkung des Ruders vorwiegen, und für den Körper ein Antrieb nach vorn entstehen. Die Ursache für dies Verhalten liegt darin, daß das Wasser im Laufe dieses gleichförmigen Ruderschlages immer geringeren Widerstand leistet, weil es aus dem ruhenden in einen mit dem Ruderblatt bewegten Zustand übergeht.

Da überhaupt der Widerstand des Wassers annähernd mit dem Quadrate der Geschwindigkeit wächst, mit der sich ein Körper darin bewegt, so kann durch ungleichförmige Geschwindigkeit des Ruderschlages die Hauptrichtung des Schlages nach Belieben auf jede Stelle der Schlagbewegung verlegt werden.

Der Fischschwanz ist nun keine starre ebene Fläche, sondern er kann unter der Einwirkung des Wasserwiderstandes passiv, und durch Muskeltätigkeit aktiv gekrümmt werden. Pettigrew nahm an, daß der Fischschwanz beim wirksamen Teile des Schlages konkav zur Schlagrichtung gekrümmt sei. Strasser weist diese Ansicht zurück.

Durch die zur Schlagrichtung konvexe Biegung der Schwanzfläche erhält ohne Zweifel die Wirkung des Schlages eine günstigere Richtung. Freilich kann die seitliche Komponente, die der schräg gegen das Wasser gerichtete Schlag besitzt, nie ganz verschwinden. Es wird daher auch, wie schon Borelli lehrte, der Antrieb nicht gerade nach vorn, sondern stets nach vorn und seitwärts erfolgen. Durch einen Schwanzschlag nach links erhält der Schwanz einen Antrieb nach rechts, der Kopf der Fisches wird daher nach links abgelenkt. Bei einer raschen Folge von Schlägen heben diese Ablenkungen einander immer gleich wieder auf, und man sieht am schnell schwimmenden Fische nur eine leichte Hinundherbewegung. Uebrigens ist die tiefe von beiden Seiten platte Form des Fischkörpers geeignet, die seitlichen Abweichungen einzuschränken.

Endlich ist in Betracht zu ziehen, daß beim Schwimmen der ganze Körper des Fisches, nicht bloß der Schwanz, in Bewegung ist. Durch aktive Krümmung kann die seitliche Wirkung der Schwanzschläge aufgehoben werden. Es kommt dann, neben der Rudertätigkeit des Schwanzes, das Prinzip der Schlangenbewegung in Rechnung, die in wellenförmiger Krümmung des ganzen Leibes besteht.

Diese Schlangenbewegung ist bei den aalartigen Fischen ausgebildet, die beim schnellen Schwimmen den ganzen Körper so schlängeln, daß er eine Reihe nach hinten ablaufender Wellen bildet. Beim langsamen Schwimmen bedienen sich die Aale nur ihres Flossensaumes, der aber in mechanisch derselben Weise wirkt. Die Theorie der Flossensaumbewegung und der Schlangenbewegung ist die gleiche, nur die äußere Form ist verschieden. Ebenso ist auch die Schwimmbewegung der Schollen und des Rochens, bei denen Schlängeln und Flossensaumbewegung in senkrechter statt in wagerechter Ebene vor sich gehen, in der Theorie dasselbe wie die Schlangenbewegung (Fig. 10).

Bei der Schlangenbewegung macht der ganze Körper, bei der Flossensaumbewegung der freie Rand der Flosse wellenförmige Biegungen, die nach hinten ablaufen. Jeder Teil des Körpers der Schlange führt, auf die Längsachse des Tieres bezogen, rein seitliche, jeder Strahl der Flosse des Rochens senkrechte Bewegungen aus. Die zeitliche Folge dieser Bewegungen bedingt das Gesamtergebnis, daß eine wellenförmige Ausbiegung am Körper entlang läuft, deren mechanische Wirkung der Verschiebung eines wellenförmigen Körpers auf der Längsachse des Tieres nach hinten gleichkommt. Der Widerstand, den diese Verschiebung der Welle nach hinten findet, wirkt als Antrieb für den ganzen Körper nach vorn.

Führt man, wie Hensen es für die Flossensaumbewegung der Spermatozoen getan, die Konstruktion der Kräfte aus, die im einzelnen an jedem Teile der Flosse wirken, so findet man, daß neben dem Antrieb auch eine Anzahl seitlicher und nach oben und unten gerichteter Kräfte im Spiele sind, die einander indessen zum Teil aufheben.

Die Schwanzflosse mehrerer Arten Fische zeigt eine stärkere Entwickelung des dorsalen Teiles, der allein als Verlängerung der Wirbelsäule erscheint. Diese, als Heterocerkie bezeichnete Eigentümlichkeit hat Ahlborn mechanisch gedeutet, indem er

annimmt, daß eine vorwiegend mit dem oberen Teil wirkende Flosse den hinteren Teil des Fischkörpers empor drücke, und dadurch eine den ganzen Körper hinabtreibende „hypobatische" Wirkung habe. Umgekehrt wirkt eine nach unten vergrößerte Flosse emportreibend, „epibatisch".

Die Bewegungen der Brust-, Bauch- und Rückenflossen der Fische dienen im allgemeinen nur zum Steuern und zu langsamer Veränderung der Lage. Bei manchen Arten sind die Brustflossen zu besonderen Be-

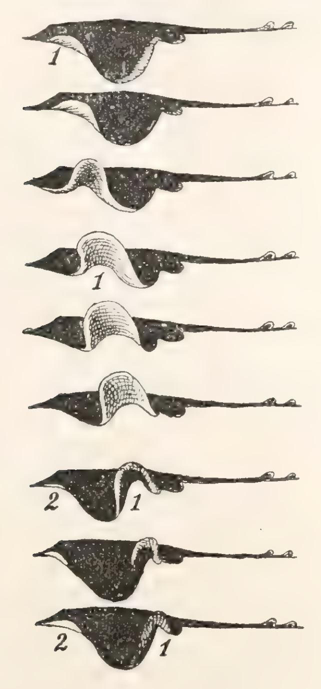


Fig. 10. Schwimmen des Rochens durch senkrechte Schlangenbewegung des Flossensaumes. Nach Marey. Ehe die Welle 1 abgelaufen ist, beginnt vorn schon eine zweite Welle 2.

wegungszwecken ausgebildet, insbesondere dienen sie bei Periophthalmus und Anabas scandens der Ortsbewegung auf trockenem Boden.

3h) Amphibien und Reptilien. Die Ortsbewegung der Amphibien und Reptilien schließt sich, wo Gliedmaßen nicht vorhanden sind, oder nicht gebraucht werden, an die Kriechbewegung der Würmer und die Schwimmbewegung der Fische an. Die Salamander lassen nämlich beim schnellen Schwimmen die Extremitäten hängen, und schwimmen ausschließlich durch Ruderschläge mit dem Schwanz. Die Schlangen bedienen sich auf festem Boden außer der Schlängelbewegung auch einer Art zu kriechen, bei der die einzelnen Rippenpaare mit den zugehörigen Bauchschildern die Rolle der einzelnen Segmente mit Borsten bei den Ringelwürmern spielen (s. S. 1063).

Die Bewegung mit Hilfe der Extremitäten schließt sich an die der vierfüßigen Säugetiere an. Einzelne Eidechsenarten laufen auch auf den Hinterfüßen, wie dies sogar von den riesenhaften Iguanodonten durch die Abdrücke ihrer Füße im Boden unzweifelhaft erwiesen ist.



Fig. 11. Zweibeiniger Lauf australischer Eidechsen. Nach Saville Kent.

3i) Vögel. Die Bewegung der Vögel auf dem Boden ist in vielen Fällen eine Schreitbewegung auf zwei Füßen, die mechanisch mit der des Menschen viel Aehnlichkeit hat. Ein besonderer Sperrmechanismus liegt der Erhaltung des Gleichgewichts im Sitzen auf Baumzweigen bei den Sperlingsvögeln zugrunde. Die Sehnen der Flexoren der Zehen werden durch die Stellung der Beinknochen beim Sitzen selbsttätig gespannt, und greifen in Vorsprünge der Sehnenscheiden ein, so daß sie in Greifstellung festgehalten werden.

Für die Ortsbewegung der Vögel ist ferner im Gegensatz zu anderen zweibeinigen Tieren das gleichbeinige Hüpfen bezeichnend, durch das sie auch den Anlauf zum Fluge zu nehmen pflegen.

Das Schwimmen bildet für viele Vögel einen wesentlichen Teil der Ortsbewegung. Von großer Bedeutung ist hierbei die Beschaffenheit des Federkleides, das durch fettiges Sekret unbenetzbar gemacht und eine große Menge Luft einschließend, wie ein Schiffsgefäß den Körper trägt. Da die Körperform der Schwimmvögel für die Fortbewegung im Wasser wenig geeignet ist, sind die Ruderflächen der Füße durch die Schwimmhäute zu unverhältnismäßiger Größe entwickelt. Am besten können sich im Wasser die Tauchervögel bewegen, die die Flügel als Flossen benutzen.

3k) Vierfüßer. Die Bewegung der Säugetiere auf dem festen Boden ist mit wenigen Ausnahmen Gang auf allen Vieren. In älteren Schriften wird darin ein besonderer Vorzug gesehen, daß bei dieser Bewegung der Körper Halt am Boden habe, aber nur Reibung in der Luft zu überwinden brauche. Dabei ist übersehen, daß um,

auf den vier Extremitäten zu gehen, die Körperlast dauernd getragen werden muß, wodurch der scheinbare Vorteil verloren geht.

Ueber die Form des Antriebes sind ebenfalls irrtümliche Anschauungen ausgesprochen worden, indem angenommen wurde, daß der Antrieb, weil er von der Muskelkraft ausgehe, notwendigerweise in der Richtung der Knochen oder Muskeln wirken müsse. Diese Vorstellung ist ganz verkehrt, denn Muskeln und Knochen führen Bewegungen gegen den Bodenwiderstand aus, und einzig dieser Widerstand bildet die eigentliche Antriebskraft. Den handgreiflichen Beweis für diesen eigentlich selbstverständlichen Satz bildet die Tatsache, daß auf schlüpfrigem Boden, zum Beispiel auf glatter Eisbahn, die Gehbewegung nicht fördert.

Die Bewegung der Beine ist also ein Drücken nach hinten, wodurch, da der Boden nicht nachgibt, der Körper nach vorn geschoben wird. Wenn das Bein durch Streckung nach hinten diese Aufgabe erfüllt hat, wird es vom Boden aufgehoben und in leicht gebeugter Stellung nach vorn gebracht um dort von neuem aufgesetzt zu werden. Beim Vierfüßer kann das Bein schon vom ersten Augenblicke an tragend und durch Rückwärtsdruck fördernd wirken.

Die Ortsbewegung der vierfüßigen Tiere ist am Pferde am genauesten untersucht, und mag deshalb hier am Beispiele des Pferdes erläutert werden.

Das Stehen der Vierfüßer ist wegen der großen Fläche, die die vier Extremitäten einschließen, und der im Verhältnis zur Größe dieser Fläche geringen Höhe des Schwerpunkts stabiler als das der Menschen.

Die mechanische Anordnung von Knochen, Muskeln und Sehnen beim Pferde bringt es mit sich, daß das Pferd, im Gegensatz zu anderen Vierfüßern, fast ohne Muskelanspannung stehen kann. Manche Pferde legen sich daher tatsächlich nie nieder.

Man unterscheidet unter den Gangarten des Pferdes drei Hauptformen als Schritt, Trab und Galopp, doch muß der Paß als vierte selbständige Form angesehen werden.

Beim Paß werden die beiden Beine einer Seite gleichzeitig vorgesetzt, und während sie den Körper vorschieben, bewegen sich die der anderen Seite nach vorne. Dabei ist also der Körper abwechselnd nur rechts und nur links unterstützt, und er wird bei jedem Schritte nach der stützenden Seite hinüber geschwenkt. Der Paß kann als ganz langsame, aber auch als sehr schnelle Gangart ausgeführt werden, wobei er dann eine Reihe weiter Sprünge von dem rechten auf das linke Beinpaar und umgekehrt darstellt.

Beim Schritt wechseln die beiden Vorderbeine und die beiden Hinterbeine untereinander regelmäßig ab, und das Hinterbein ist dem Vorderbein derselben Seite stets um einen halben Schritt voraus. Hierbei ist der Körper der Reihe nach von beiden Beinen einer Seite, von diagonal stehenden Beinen, und den beiden Beinen der anderen Seite unterstützt, er wird also ziemlich gleichmäßig getragen.

Beim Trab bewegen sich die diagonal stehenden Beine gleich. Dabei kann die Zeit, während deren sie die Erde berühren, auf die halbe Dauer der Zeit beschränkt sein, während deren sie durch die Luft geführt werden, so daß zeitweilig alle vier Beine in der Luft sind und der Körper frei schwebt.

Der Galopp ist eine Folge von Sprüngen von den Vorderbeinen auf die Hinterbeine. Ein Hinterbein verläßt zuerst den Boden, darauf das Hinterbein der anderen Seite und das Vorderbein der ersten, zuletzt das zweite Vorderbein. In derselben Reihenfolge kommen die Beine wieder auf den Boden.

Beim sogenannten Angaloppieren aus dem Stand wird dagegen zuerst ein Vorderbein gehoben, und zwar dasjenige, das bei den nachfolgenden Galoppsprüngen zuletzt auf den Boden kommt. Man bezeichnet danach den Galopp als Rechts- oder Linksgalopp. Nach der angegebenen Folge der Beine hört man bei dem eigentlichen Galopp drei Schläge auf den Boden. Es kann nun, indem die diagonal gestellten Beine, die den mittleren Schlag geben, nicht gleichzeitig, sondern nach einander auf den Boden kommen, ein Viertaktgalopp entstehen. Ferner kann, namentlich bei schneller Gangart, der Viertaktgalopp in einen Zweitaktgalopp übergehen, indem beide Hinterbeine und beide Vorderbeine gleichzeitig aufschlagen. Immer aber sind es die Hinterbeine, die zuerst auf den Boden treffen.

Ebenso wie beim Galopp können beim Paß Schritt und Trab durch Abweichungen von der oben angegebenen Schrittfolge Zwischenformen entstehen.

Obschon angegeben wird, daß dieselben Gangarten bei den übrigen Vierfüßern ebenfalls gefunden werden, bestehen doch in vielen Fällen wesentliche Unterschiede.

Der Paß ist vielen Tieren eigen, aber meist nicht in reiner Ausbildung, sondern mit Ungleichförmigkeiten, die Uebergangsformen zum Schritt bilden. Beim Trabe entspricht die Bewegung auch beim Pferde nur annähernd der angegebenen Regel, er darf aber als die am meisten verbreitete Gangart angesehen werden, da sehr viele verschiedene Vierfüßer, Hunde, Katzen, Ka-

mel, in genau derselben Weise traben wie Pferde. Eine wesentliche Ausnahme macht der Galopp, der bei kleineren Tieren eine ganz andere Form annimmt wie beim Pferde. Hunde, Hasen, Katzen, kleinere Huftiere galoppieren nämlich so, daß sie von den Hinterbeinen auf die Vorderbeine springen. Es heben sich also erst gleichzeitig beide Vorderbeine, dann springt das Tier von den Hinterbeinen

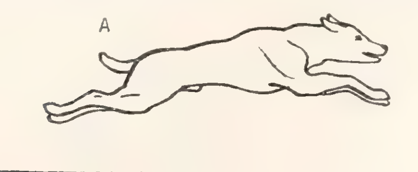




Fig. 12. Galoppsprünge des Hundes nach Muybridge. A. Der Hund springt von den Hinterbeinen auf die Vorderbeine. B. Die Vorderbeine verlassen den Boden wieder, ehe die Hinterbeine zur Erde gekommen sind, so daß ein Zwischensprung von den Vorderbeinen auf die Hinterbeine entsteht.

in die Luft, schwebt mit ausgestreckten Beinen und kommt auf die Vorderbeine nieder. Dann erst schlagen die Hinterbeine auf (Fig. 12, A).

Bei sehr schnellem Galopp greifen dann die Hinterbeine weit vor die Vorderbeine aus, ja die Vorderbeine verlassen schon zum zweiten Mal den Boden, ehe die Hinterbeine herabgekommen sind (Fig. 12, B).

31) Stehen des Menschen. Die Bewegungsformen des Menschen sind genauer untersucht als die aller anderen Tiere, es bieten sich aber gegenüber denen anderer Zweifüßer keine grundsätzlichen mechanischen Unterschiede dar.

Das aufrechte Stehen kann mechanisch auf zwei Arten betrachtet werden, indem man entweder den Körper als in irgendeiner Haltung durch seine Muskeln starr gemacht annimmt, und die Bedingungen der Unterstützung untersucht, oder den Aufbau des Körpergerüsts aus seinen einzelnen Abschnitten in Betracht zieht.

Die erste Art der Betrachtung zeigt, daß bei aufrechter Haltung der Schwerpunkt verhältnismäßig hoch über einer verhältnismäßig kleinen Unterstützungsfläche gelegen ist, so daß die Festigkeit des Stehens nur gering ist.

Bei der zweiten Art der Betrachtung ist es notwendig, die Gleichgewichtsbedingungen der einzelnen gegeneinander beweglichen Körperteile von oben nach unten zu untersuchen, weil jeder höhere Abschnitt von dem unteren getragen wird, und dessen Gleichgewicht beeinflußt.

Der Kopf ist auf der Halswirbelsäule beweglich, sein Schwerpunkt liegt über dem Türkensattel des Keilbeins, im Profil am oberen Ansatz des Ohrmuschelrandes. Der Schwerpunkt fällt demnach 0,5 Zentimeter vor das Atlasgelenk und der Kopf hat also Uebergewicht nach vorn. Um ihn aufrecht zu halten, muß daher die Nackenmuskulatur einen gewissen Zug ausüben.

Der Rumpf darf als ein einziger starrer Abschnitt aufgefaßt werden, da er auch an der Leiche in aufrechter Haltung aufgestellt werden kann. In dieser Beziehung ist die Angabe Parows wichtig, daß die Spannung der Bauchwände die Wirbelsäule unterstützt. Der Rumpf ruht beweglich auf den beiden Schenkelköpfen, kann also um die Querachse des Hüftgelenks nach vorn und hinten kippen. Der gemeinsame Schwerpunkt von Kopf, Rumpf und daran hängenden Armen liegt nun um 0,8 Zentimeter hinter der Hüftgelenksachse, der Rumpf strebt also nach hinten überzufallen. Daher muß die vordere Schenkelmuskulatur, vor allem wohl der Musculus psoas gespannt sein, um den Rumpf in seiner Stellung zu halten.

Die Oberschenkel stehen mit dem Oberkörper belastet auf den Kniegelenken in so weit vorwärts geneigter Stellung, daß der gemeinsame Schwerpunkt von Oberkörper und Oberschenkeln sich etwa einen Zentimeter vor der Querachse der beiden Kniegelenke befindet. Daher hat dieser ganze Teil des Körpers das Bestreben, um die Querachse der Kniegelenke nach vorn überzukippen. Diesem Bestreben leistet eine entsprechende Spannung der Muskeln und Bänder, die hinter dem Kniegelenk liegen, Widerstand. Es wird also keine Muskeltätigkeit erfordert, um das Kniegelenk gestreckt zu halten, vielmehr ist eine gewisse Spannung der Beuger nötig, um die Bänder des Kniegelenks, die die Ueberstreckung hemmen, zu entlasten. Man kann dies daran erkennen, daß bei zwangloser Haltung im Stehen die Kniescheibe lose ist, was beweist, daß der einzige Streckmuskel des Knies, der Quadriceps, untätig ist. Dies ist der Fall, selbst wenn das Kniegelenk noch nicht vollkommen gestreckt, geschweige denn „durchgedrückt" ist.

Die Unterschenkel stehen auf den Fuß-

gelenken ebenfalls in nach vorn geneigter Lage, streben also unter der Last des Körpers nach vornüber zu fallen. Diesem Bestreben hält die Spannung der Wadenmuskeln das Gleichgewicht.

Der Fuß endlich ruht von der Sohlenfläche unterstützt auf dem Boden. Es lastet auf ihm im Fußgelenk die gesamte Last aller übrigen Teile des Körpers, und es zieht am Fersenbeinfortsatz der Wadenmuskel, der, indem er am Knie angreift, den Unterschenkel mit einem Teile seiner Zugkraft noch mehr gegen das Fußgelenk andrückt.

Fig. 13. „Bequeme Haltung" beim Stehen nach Braune und Fischer. Die Schwerlinie SS fällt hinter das Hüftgelenk, aber vor Kniegelenk u. Fußgelenk.

Für jeden Abschnitt des Körpergerüstes kann man nach der oben geschilderten Weise die genauere Darstellung der Kräftepaare vornehmen, die durch die Schwere der einzelnen Körperteile und durch den Muskelzug hervorgerufen werden. Da der Zustand ruhigen Stehens Gleichgewicht voraussetzt, so kann man auch die Größe der erforderlichen Muskelspannungen berechnen wenn man die Massenverteilung des Körpers kennt. So zum Beispiel hat sich aus Braune und Fischers Bestimmungen ergeben, daß bei zwanglosem Stehen der Gesamtschwerpunkt etwa 4 Zentimeter vor die Querachse der beiden Fußgelenke fällt. Die Zugrichtung der Wadenmuskeln geht etwa 3 Zentimeter hinter der Fußgelenkachse vorbei. Es muß also beim zwanglosen Stehen die Spannung der Wadenmuskeln sich zum Körpergewicht verhalten, etwa wie 4 : 3.

Obschon die hergebrachte anatomische Auffassung als Grund- oder Normalstellung des Menschen diese symmetrische Haltung mit geschlossenen Fersen annimmt, ist die Haltung beim Stehen in Wirklichkeit meist unsymmetrisch, d. h., der Körper wird von einem Beine getragen, während das andere, leicht auf dem Boden aufgesetzt, zur Erhaltung des Gleichgewichts dient. Noch mehr als die anatomische Grundstellung weicht die militärische Grundstellung von der natürlichen Haltung ab, da hier Herausdrücken der Brust, Anspannung der Gesäß- und Oberschenkelmuskeln und andere zum bloßen Stehen unnötige Tätigkeiten gefordert werden.

3m) Gehen und Laufen des Menschen. Das Gehen des Menschen, im allgemeinen betrachtet, kann als ein einfacher Fall der für die Ortsbewegung der Tiere überhaupt angegebenen Bewegungsweise bezeichnet werden, in dem in jedem Augenblicke der Körper mit einem Fuße einen Stützpunkt am Boden hat, von dem aus der andere Fuß nach vorn gebracht wird, um einen neuen Stützpunkt zu nehmen. Im Gegensatz zum Laufen ist die Gehbewegung dadurch gekennzeichnet, daß der erste Stützpunkt immer erst verlassen wird, nachdem der neue gewonnen ist. Auch beim schnellsten Gehen ruht also der Körper stets wenigstens mit einem Fuße auf dem Boden, und zwischen je zwei Schritten kurze Zeit hindurch mit beiden Füßen.

Bei dieser abwechselnden Tätigkeit der Beine lassen sich im Laufe eines Doppelschrittes je drei Perioden unterscheiden. Das vorn aufgesetzte Bein nimmt die Last des im Laufe der ganzen Bewegung dauernd vorwärtsbewegten Körpers auf, und unterstützt sie während ihrer weiteren Fortbewegung. Dies ist die Periode des Stützens. Diese geht, indem der Körper weiter nach vorn bewegt wird, in die Periode des Stemmens über, in der das auf dem Boden ruhende Bein den Körper vorwärtsschiebt. Während dieser Zeit ist der andere Fuß nach vorn gebracht und auf den Boden gesetzt worden, er beginnt den Körper zu unterstützen. Das erst betrachtete Bein wird vom Boden gehoben und tritt in die Periode des Schwingens ein, in der der Fuß durch die Luft nach vorn gelangt.

Es könnte scheinen, als sei eine Unterstützung des Körpers durch das vorn aufgesetzte Bein erst von dem Augenblick an möglich, in dem sich der Schwerpunkt des Körpers senkrecht über dem unterstützenden Fuß befindet. Es ist aber nicht so, weil während der Gehbewegung die ganze Masse des Körpers im Schwung bleibt, und dadurch gegen das nach vorn aufgesetzte Bein angetrieben wird. Dadurch wird es möglich, daß der hintere, stemmende Fuß bei schnellem Gehen schon den Boden verlassen kann, wenn der vorn befindliche Fuß eben erst den Boden berührt hat, und das vorgesetzte Bein noch schräg nach hinten steht.

Ferner könnte es scheinen, als sei eine vorwärtstreibende Wirkung des auf dem Boden stehenden Beines erst von dem Augenblicke an möglich, in dem der Körper die Lage senkrecht über dem Fuß nach vorn überschritten hat. Das trifft aber auch nicht völlig zu, weil die vorwärtstreibende Tätigkeit des Beines nicht allein in einer Streckbewegung, sondern auch in einer Rückwärtsbewegung besteht, die infolge der Gegenwirkung des Bodens den Körper vorwärts treibt. Durch diese Betrachtung werden die Grenzen der Perioden des Stützens

und Stemmens verwischt, beide gehen ineinander über.

Im einzelnen gestaltet sich die Bewegung der Beine beim Gehen wie folgt: Das nach vorn geschwungene Bein ist gestreckt, die Fußspitze gehoben, die Ferse berührt zuerst den Boden, dann legt sich die Sohle nieder. Wäre das Bein eine steife Stütze, so müßte das Hüftgelenk bei der weiteren Bewegung einen Kreisbogen über dem Fuße beschreiben. Diese Kreisbewegung wird dadurch abgeflacht, daß zunächst eine Beugung im Kniegelenk, und nachdem die senkrechte Stellung

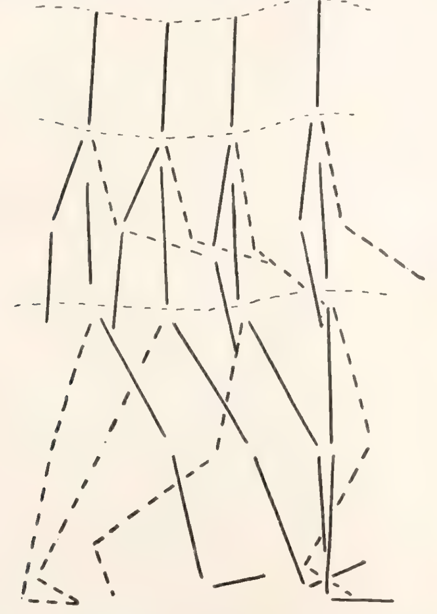


Fig. 14. Gang des Menschen nach der Aufnahme von Braune und Fischer. Zwischen der letzten und vorletzten Stellung ist der Zeitabstand um ein Drittel größer als zwischen erster und zweiter. Auf die letzte Stellung folgt nach etwa dem gleichen Zeitraum die erste Stellung auf entgegengesetzter Seite. Die Arme sind nur bis zum Handgelenk angedeutet.

überschritten ist, Streckung des Knie- und Fußgelenks stattfindet. Namentlich durch die Streckung des Fußgelenks verlängert sich das Bein so, daß es eine schiebende Wirkung auf die Körperlast ausübt. Nachdem inzwischen das andere Bein den Boden berührt hat, wird das Knie des bis dahin stemmenden Beines leicht gebeugt, die Fußspitze angezogen, und dadurch frei vom Boden gehoben, und das Bein nach vorn geschwungen.

Der Vorschwung, von dem die Gebrüder Weber angegeben hatten, daß er eine rein passive Pendelschwingung sei, ist nach O. Fischers Bestimmungen durch Muskeltätigkeit bedingt, die nur während eines sehr kurzen Zeitraums auf Null sinkt.

Während des Vorschwunges ist die Fußspitze erst etwas einwärts, dann grade, und kurz vor dem Niedersetzen des Hackens etwas auswärts gerichtet.

Durch die Bewegungen der Beine werden dem Rumpf wechselnde Antriebe erteilt, die zum Teil durch aktive Bewegungen der Rumpfmuskulatur ausgeglichen werden. Vor allem findet ein merkliches Auf- und Abschwanken statt, indem der Rumpf in dem Augenblick in dem er senkrecht über dem tragenden Fuß steht, um etwa 4 Zentimeter höher ist, als in dem Augenblick, in dem beide Beine auseinander gespreizt stehen. Gleichzeitig schwankt das Becken bei jedem Schritt nach der Seite des unterstützenden Beines hinüber. Außerdem folgt das Becken in gewissem Masse den Schwingungen der Beine, indem das Hüftgelenk jeder Seite bei jedem Schritte ein wenig vorgeschoben wird.

Die Schultern machen ähnliche, im allgemeinen entgegengesetzte Bewegungen, der Kopf macht ganz geringe seitliche Schwankungen, die wiederum denen der Schultern entgegengesetzt sind. Die Arme führen, wohl infolge der Bewegung der Schultergegend, Schwingungen aus, die denen des Beckens entgegengesetzt sind, es schwingt also der rechte Arm nach vorn, während das linke Bein vorgesetzt wird und umgekehrt.

Aus den Beschleunigungen und Verzögerungen, die jeder einzelne Körperabschnitt während der Gehbewegung erleidet, hat Fischer die bei der ganzen Bewegung wirksamen Kräfte einzeln berechnen können. Insbesondere mag hier nur die Bewegung des Gesamtschwerpunktes betrachtet werden. Da ein Massensystem seinen Schwerpunkt nur unter der Einwirkung äußerer Kräfte verschieben kann, von äußeren Kräften bei der Gehbewegung aber nur eine, nämlich der Widerstand des Bodens, merklich in Betracht kommt, so können die Beschleunigungen und Verzögerungen die der Gesamtschwerpunkt des Körpers beim Gehen erfährt, ohne weiteres auf gleiche und entgegengesetzte Kraftwirkungen des Bodenwiderstandes zurückgeführt werden.

Indem Fischer für eine hinreichend große Zahl aufeinanderfolgender Stellungen des Körpers beim Gehen die Lage des Gesamtschwerpunktes berechnete, erhielt er dessen Bahn im Raum. Aus der Form dieser Bahn, und den dazu gehörigen Geschwindigkeiten für jeden Zeitpunkt der Bewegung berechnete er die Beschleunigungen und Verzögerungen in senkrechter, seitlicher und sagittaler Richtung. Einer Beschleunigung des Schwerpunktes nach oben muß ein entsprechend erhöhter Druck des unterstützenden Fußes gegen den Boden, einer

Beschleunigung nach vorn ein entsprechend großer Reibungswiderstand des Fußes am Boden gegen Ausgleiten nach hinten gegenüberstehen. Diese Berechnung zeigte, daß die rund 59 kg schwere Versuchsperson beim Gehen einen Maximaldruck von über 70 kg und einen Minimaldruck von 25 kg auf den Boden ausübte. Die vorwärtstreibende Kraft wurde im Maximum zu 16 kg gefunden, im Augenblick, in dem ein Fuß eben vom Boden abstößt.

Das Laufen unterscheidet sich vom Gehen dadurch, daß jeder Fuß den Boden verläßt, ehe der andere niedergesetzt wird. Der Lauf besteht also aus einer Reihe von Sprüngen von einem Fuß auf den anderen. Bei diesem Unterschiede handelt es sich nicht nur um eine Verschiedenheit des Zeitraumes, sondern es muß, damit der Körper bis zum Niedersetzen des anderen Fußes in der Luft schwebend bleibe, bei jedem Schritte ein kräftiger Abstoß gegeben werden, wodurch eine ganz andere Muskeltätigkeit bedingt wird, als die des Gehens.

Insbesondere tritt bei schnellem Laufen der Fuß nicht mit der Sohle, sondern nur mit dem Ballen auf. Dadurch wird die wirksame Länge des Beines vermehrt, und eine größere Schrittlänge erzielt.

Da bei schnellem Lauf sowohl die Schrittlänge als die Schrittzahl erhöht wird, bis zu über 3 Schritt von je 3 m beim Wettlauf, wird die Anforderung an die Muskulatur sehr groß, denn es muß, um den Schritt zu verlängern, ein stärkerer Abstoß erteilt werden, und es ist bei der größeren Schrittzahl dazu weniger Zeit vorhanden.

Die Hebung und Senkung des Schwerpunktes kann bei langsamem Lauf in engen Grenzen gehalten werden, so daß sie nicht wesentlich größer ist als beim Gehen. Bei schnellem Lauf erfordert jeder Schritt gewissermaßen einen Weitsprung, bei dem der Schwerpunkt eine beträchtliche Höhe erreicht, so daß die Schwankungen 15 cm und darüber betragen.

Literatur. *Zu 1:* ***Milne Edwards,*** *Leçons de physiologie comparée, Bd. 13. —* ***Strasser,*** *Ueber die Grundbedingungen der aktiven Lokomotion, Abh. d. Naturf. Ges. zu Halle XV, 1880. —* ***Haughton,*** *Principles of animal mechanics, 2. ed., London 1873. —* ***Marey,*** *Le mouvement, Paris 1873. —* ***Derselbe,*** *Locomotion in d'Arsonval's Traité de physique biologique, Paris 1901.*

Zu 2a und b: ***Engelmann,*** *Protoplasmabewegung und Flimmerbewegung. In Hermanns Handbuch der Physiologie Bd. I, 1879. —* ***Jensen,*** *Protoplasmabewegung. In Asher und Spiros Ergebnissen der Physiologie I,* II, *1902. —* ***Weiss,*** *Protoplasmabewegung und Flimmerbewegung. In Nagels Handbuch der Physiologie Bd. 4, 1909. —* ***Pütter,*** *Flimmerbewegung. In Asher und Spiros Ergebnissen der Physiologie II,* II, *1903. —* ***Verworn,*** *Allgemeine Physiologie 3. Aufl., 1901.*

Zu 2cα: ***Graber,*** *Die Insekten, München 1877. —* ***F. Reuleaux,*** *Lehrbuch der Kinematik Bd. 2, 1900. —* ***O. Fischer,*** *Kinematik organischer Gelenke 1907. —* ***R. Fick,*** *Handbuch der Anatomie und Mechanik der Gelenke 1904. —* ***Strasser,*** *Lehrbuch der Muskel- und Gelenkmechanik, I. Allgemeiner Teil, 1908. —* ***R. du Bois-Reymond,*** *Spezielle Muskelphysiologie oder Bewegungslehre 1903.*

Zu 2cβ: ***O. Fischer,*** *Physiologische Mechanik, Enzyklopädie der Mathematischen Wissenschaften, Leipzig 1904, IV, 8. —* ***Derselbe,*** *Theoretische Grundlagen für eine Mechanik der lebenden Körper 1906. —* ***Derselbe,*** *Beiträge zu einer Muskelstatistik und Muskeldynamik. In den Abh. d. Sächs. Gesellsch. d. Wissenschaften. —* ***Braune und Fischer,*** *Der Gang des Menschen. Ebenda. —* ***A. Fick,*** *Spezielle Bewegungslehre. In Hermanns Handbuch der Physiologie Bd. 1, 1879. —* ***R. du Bois-Reymond,*** *Physiologische Prinzipien der Muskelmechanik. In Lewandowskys Handbuch der Neurologie 1910. —* ***Duchenne,*** *Physiologie des mouvements, Paris 1867.*

Zu 3: Die schon zitierten Werke von ***Marey*** *und von* ***Milne Edwards.*** *— Ferner* ***Pettigrew,*** *Animal Locomotion, Edinburg 1873. —* ***Bergmann und Leuckart,*** *Vergleichende Physiologie des Tierreichs, Stuttgart 1855.*

Zu 3a Protozoen: Die schon zitierten Werke von ***Engelmann,*** *von* ***Weiss,*** *von* ***Jensen*** *und von* ***Verworn.*** *— Ferner* ***Bütschli,*** *Protozoen. In Bronns Klassen und Ordnungen des Tierreichs. —* ***Hodge und Dellinger,*** *Movement of Amoebae, American Journal of Physiology Bd. 15, S. 17. —* ***Le Dantec,*** *Sur l'adhérence des Amibes aux corps solides, Compt. rend. de l'Acad. Bd. 95, S. 210. —* ***Otto Müller,*** *Ortsbewegung der Bacillariceen, Ber. d. Deutschen Botan. Gesellsch. XI, S. 571. —* ***Jennings,*** *Contributions to the study of the behaviour of lower organisms, Washington 1904.*

Zu 3b Medusen: ***Verworn,*** *Studien zur Physiologie der Flimmerbewegung, Pflügers Arch. 48, S. 149. —* ***Marshall,*** *Ueber einige Lebenserscheinungen der Süßwasserpolypen, Zeitschr. f. wiss. Zool. 37, S. 664, 1882. —* ***Eimer,*** *Die Medusen physiologisch und morphologisch auf ihr Nervensystem untersucht, Tübingen 1878.*

Zu 3c Echinodermen: ***Mangold,*** *Studien zur Physiologie des Nervensystems der Echinodermen, Pflügers Arch. Bd. 122, S. 315; Bd. 123, S. 1; Bd. 126, S. 321. —* ***Derselbe,*** *Ueber das Leuchten und Klettern der Schlangensterne, Biol. Zentralbl. 28, S. 169, 1908. —* ***v. Uexküll,*** *Physiologie des Seeigels, Zeitschr. f. Biol. 34, S. 298; 37, S. 334 und 39, S. 73 u. a. m.*

Zu 3d Würmer: ***v. Uxküll,*** *Sipunculus nudus, Zeitschr. f. Biol. 33, S. 1, 1896 und 44, S. 269, 1904. —* ***Biedermann,*** *Die peristaltischen Bewegungen der Würmer und der Tonus glatter Muskeln, Pflügers Arch. 102, S. 475, 1904. —* ***Friedländer,*** *Kriechen der Regenwürmer, Biol. Zentralbl. Bd. 8, 1888. —* ***Dewitz,*** *Ueber die Fortbewegung der Tiere auf senkrechten glatten Wänden vermittelst eines Sekretes, Pflügers Arch. 33, S. 440.*

Zu 3e Gliedertiere: ***Ortmann,*** *Deca-*

poden. In Bronns Klassen und Ordnungen des Tierreichs Bd. 5, 7. — **List,** *Ueber die Bewegungen der Krebse, Morpholog. Jahrb. 27, 1895.* — **Demoor,** *Recherches sur la marche des insectes et des arachnides, Arch. d. Biol. X, 1890, S. 564.* — **Gaubert,** *Sur la marche des Myriapodes, Bull. Soc. Philomath. Paris III, S. 1, 1891.* — **Graber,** *Die Insekten I, München 1877.* — **Bethe,** *Vergleichende Untersuchungen über die Funktion des Zentralnervensystems der Arthropoden, Pflügers Arch. Bd. 68, S. 455, 1897.* — **Burmeister,** *Handbuch der Entomologie Bd. 1, Kap. IV, 1832.* — **Leisewitz,** *Ueber chitinöse Fortbewegungsapparate einiger Insektenlarven, München 1906.*

Zu 3f Weichtiere und Manteltiere: **Car,** *Mechanismus der Lokomotion bei den Pulmonaten, Biol. Zentralbl. 18, S. 426, 1897.* — **Biedermann,** *Die Innervation der Schneckensohle, Pflügers Arch. III, S. 251.* — **Vles,** *Sur le mécanisme de la nage de Pecten, Compt. rend. de l'Acad. Bd. 143, 2, S. 611.* — **Gujart,** *Gasteropodes opithobranches, Mem. Soc. Zool. de France 1901, XIV, S. 1.* — **Baglioni,** *Ueber die Bewegung von Argonauta, Zeitschr. f. Biol. 52, S. 107.* — **Seeliger,** *Tunicaten. In Bronns Klassen und Ordnungen des Tierreichs.*

Zu 3g Fische: Die schon zitierten Werke von **Bergmann und Leuckart** *und von* **Marey.** — *Ferner:* **Baglioni,** *Zur Physiologie der Schwimmblase, Zeitschr. f. allgem. Physiologie 8, S. 1, 1908.* — **Borelli,** *De motu animalium, Leyden 1710.* — **Strasser,** *Zur Lehre von der Ortsbewegung der Fische durch Biegungen des Leibes und der unpaaren Flossen, Stuttgart 1882.* — **Ahlborn,** *Ueber die Bedeutung der Heterocercie, Zeitschr. f. wiss. Zool. 61, S. 1, 1895.* — **Hensen,** *Zeugung. In Hermanns Handb. Bd. 4, 1881.* — **Günther,** *An introduction to the study of fishes, Edinburg 1880.*

Zu 3h Amphibien und Reptilien: **Owen,** *Comparative anatomy and physiology of Vertebrates, London 1866, Bd. 1, S. 259.* — **Saville Kent,** *Bipedal running of Lizards, Proc. Internat. Congr. Zool. 1898, S. 168.* — **Dollo,** *Les allures des Iguanodon d'après les empreintes des pieds et de la queue, Bull. Sc. France Belg. XI, 1905.*

Zu 3i Vögel: Die schon zitierten Werke von **Pettigrew,** *von* **Bergmann und Leuckart.** — *Ferner:* **Colin,** *Physiologie comparée, Paris 1871.* — **Schaffer,** *Ueber die Sperrvorrichtung an den Zehen der Vögel, Zeitschr. f. wiss. Zool. 73, S. 377, 1903.*

Zu 3k Vierfüßer: Die schon zitierten Werke von **Milne Edwards,** *von* **Colin** *und von* **Marey.** — *Ferner:* **Zietschmann,** *Kapitel Bewegungslehre. In Ellenberger und Zeunert, Vergleichende Physiologie der Haussäugetiere, Berlin 1910.* — **Muybridge,** *Animal Locomotion (Sammlung von Momentbilderreihen).* — **Le Hello,** *De l'action des organes locomoteurs agissant pour produire les mouvements des animaux. Journal de l'anatomie et de physiologie 33, S. 356, 1897.*

Zu 3l: Das schon zitierte Werk von **R. du Bois-Reymond,** *Spezielle Muskelphysiologie.* — *Ferner:* **Braune und Fischer,** *Ueber den Schwerpunkt des menschlichen Körpers. — Abh. d. Math.-Physik. Kl. d. K. Sächs. Gesellsch. d. Wiss. XV, Nr. 7, 1889.* — **Haycraft,** *Animal mechanics. In Schäfers Textbook of Physiologie II, London 1900.*

Zu 3m: Das schon zitierte Werk von **Braune und Fischer,** *Der Gang des Menschen.* — *Ferner:* **W. und E. Weber,** *Mechanik der menschlichen Gehwerkzeuge, Göttingen 1836.*

R. du Bois-Reymond.

Bewegung.

Tierflug.

1. Definition. 2. Verbreitung des Flugvermögens. 3. Die Tragfähigkeit von schräg bewegten Flächen. 4. Schwebegeschwindigkeit und Sinkverhältnis. 5. Die Typen der Flieger: a) Flieger ohne Flugmotor. b) Flieger mit Motor: α) Schwingenflieger. β) Schraubenflieger; γ) Drachenflieger. 6. Das Schweben und Kreisen 7. Die Flugarbeit. 8. Die Flugleistungen.

1. Definition. Die Lehre von der Bewegung der Tiere in der Kontinuität eines Mediums (Wasser, Luft), die wir als „Schwimmen" und „Fliegen" bezeichnen, bieten eine Reihe tiefgreifender Unterschiede gegenüber den Bewegungen an der Grenzfläche zweier Medien (Kriechen, Gehen, Laufen, Springen). Vor allem gewinnt die Lehre vom Formwiderstand der bewegten Körper hier eine Bedeutung, die ihr bei den anderen Bewegungsarten nicht zukommt. Trotz der großen formalen Uebereinstimmung, die die Gesetze der Hydrodynamik und Aerodynamik zeigen, sind die tatsächlichen Unterschiede in den Bewegungsmechanismen, die im Wasser (beim Schwimmen) und in der Luft (beim Fliegen) verwendet werden, so große, daß vorläufig eine getrennte Darstellung beider Bewegungsarten nötig erscheint.

Wir wollen als Fliegen eine Bewegung in der Luft bezeichnen, bei der dem freien Falle Kräfte entgegenwirken, die seine Geschwindigkeit verringern und die Bewegungsrichtung von der Vertikalen ablenken.

Bei dieser Begrenzung des Begriffes brauchen wir den einfachen Fallschirmeinrichtungen, wie sie viele Pflanzensamen besitzen, keine Aufmerksamkeit zu schenken: sie verlangsamen nur den Fall, ohne die Bewegungsrichtung zu ändern, so daß sie in ruhender Luft vertikal sinken.

Es ist aber notwendig, noch eine weitere Bestimmung in den Begriff des Fliegens aufzunehmen, nämlich die aktive Beteiligung der fliegenden Organismen an der Einleitung, Durchführung oder Regulierung des Fluges. Diese aktive Beteiligung kann allerdings sehr verschiedener Art sein, und braucht nicht immer darin zu bestehen, daß der fliegende Organismus die Kräfte produziert, die ihm das Verweilen in der Luft ermöglichen (s. unter **6** Schweben und Kreisen).

2. Verbreitung des Flugvermögens. Die Fähigkeit zu fliegen, ist im Tierreich nur in den beiden großen Stämmen der Gliederfüßler (Arthropoden) und Wirbeltiere entwickelt, innerhalb dieser Gruppen aber ungemein weit verbreitet. Vor allem sind es die Landtiere, von denen 75 % fliegen können, während unter den Wassertieren nur die fliegenden Fische als seltene Ausnahme von Flugtieren vorkommen. Die Zahl der fliegenden Spezies verteilt sich auf die einzelnen Gruppen folgendermaßen:

Insekten	etwa 250 000	fliegende	Arten,
Vögel	„ 13 000	„	„
Fledermäuse	„ 600	„	„
Flugfische	„ 60	„	„

Zu diesen käme noch die nicht geringe Zahl der ausgestorbenen Flieger, die wesentlich zu den Sauriern gehören und unter den lebenden Arten die Flattertiere und Gleitflieger, die uns Vorstufen im Erwerb einer ausgiebigen Flugfähigkeit zeigen. Auf der Entwickelungsstufe der Gleitflieger stehen auch einige Pflanzensamen, z. B. diejenigen von Bignonia und Zanonia, deren „Sinkverhältnis" (s. unter 4) den besten tierischen Gleitfliegern kaum nachstehen dürfte und die in der Gestaltung ihrer Segelflächen einigen künstlichen Flugapparaten als Vorbild gedient haben.

3. Die Tragfähigkeit von schräg bewegten Flächen. Zum Verständnis der meisten Formen des tierischen Fluges (Ausnahme: Schraubenflieger s. u.) gehört die Kenntnis der Wirkungen, welche an ebenen oder besser noch an gewölbten Flächen auftreten, die in schräger Stellung eine Relativbewegung gegen die umgebende Luft haben.

Damit ein Körper dynamisch in der Luft schweben kann — also ohne Anwendung eines Ballons, d. h. statisch — muß beständig eine Kraft senkrecht nach unten auf die Luft ausgeübt werden, deren Größe mit dem Gewicht des schwebenden Körpers übereinstimmt.

Man kann nun eine derartige Kraft nur dadurch andauernd auf die Luft ausüben, daß man beständig neuen Luftmassen eine Geschwindigkeit in der Richtung der Kraft erteilt, wie dies beim schrägen Fall von Platten geschieht. Dabei erzielen gewölbte Platten bessere Resultate als ebene, da sie mehr Luft und diese mit größerer Geschwindigkeit nach unten werfen als die ebenen, ohne daß sie dabei — wie Versuche zeigen — wesentlich mehr Widerstand hätten.

Bei der günstigsten Gestaltung der Flächen ist die entwickelte Tragkraft (d. h. die senkrechte Komponente des Luftwiderstandes) für 1 qm Fläche $= 0{,}05 \cdot w^2$ in kg, wenn w die horizontale Geschwindigkeit der Platte bezeichnet. Bei einer Geschwindigkeit von 1 m/sec kann also ein Quadratmeter Segelfläche 50 g tragen, bei 5 m/sec bereits 1,25 kg, bei 10 m/sec. 5 kg usw. Die Wirkung einer entsprechend gewölbten Fläche ist etwa so groß wie diejenige einer ebenen, die 1,5 mal größer ist.

Es gibt dementsprechend für jedes Flugtier eine bestimmte Geschwindigkeit, bei welcher es in ruhender Luft oder homogener Luftströmung gerade zu schweben vermag („Schwebegeschwindigkeit"), und diese ist abhängig von der „Flächenbelastung", d. h. von der Belastung pro qm Segelfläche. Welche Unterschiede in dieser Beziehung bestehen, mögen einige Beispiele erläutern.

	Flächenbelastung kg/m²	Schwebegeschwindigkeit m/sec
Kohlweißling . . .	0,09	1,3
Zwergfledermaus .	0,74	3,9
Schwalbe	1,67	5,7
Sperling	3,70	8,6
Taube	3 73	8,7
Krähe	3,92	8,8
Fasan	11,20	14,9
Ente	14,60	17,2
Trappe	16,20	18,0

4. Schwebegeschwindigkeit und Sinkverhältnis. Die Schwebegeschwindigkeiten der guten Flieger geringer und mittlerer Größe (Sperling bis Krähe) liegen danach zwischen 8 und 9 m/sec und bei Berücksichtigung der Flügelwölbung noch etwas niedriger. Die schlechten, wenig ausdauernden Flieger (Fasan, Ente) haben, selbst bei Berücksichtigung der Flügelwölbung, Schwebegeschwindigkeiten von 12 bis 14 m/sec, und die Trappe erreicht dieselbe erst bei 18, bezw. unter Berücksichtigung der Flügelwölbung bei etwa 12 m/sec und fliegt äußerst schwerfällig auf.

Bewegt sich eine Fläche mit einer geringeren als der Schwebegeschwindigkeit durch die Luft, so sinkt sie allmählich im Gleitfluge herab. Man bezeichnet dabei das Verhältnis der vertikal durchfallenen Strecke zu der horizontal durchglittenen als das „Sinkverhältnis" der Fläche. Fliegermodelle zeigen selten günstigere Sinkverhältnisse als 1: 7 oder höchstens 1: 8. Ueber die Werte der Sinkverhältnisse bei Flugtieren sind wir nicht näher unterrichtet, doch dürften sie günstiger sein als die Werte der künstlichen Modelle.

Für die Stabilität des Fluges einer Fläche ist das Verhältnis von Länge und Breite, die Lage der versteifenden Elemente und des Schwerpunktes der Belastung maßgebend, sowie vor allem die Elastizität des

Materials. Bei einer gewissen Geschwindigkeit müssen sich die Hinterkanten schwebender Flächen elastisch durchbiegen können. Bei den Vögeln besitzen die Hinterränder der Flügel diese Fähigkeit in hohem Maße und die Entfernung dieser Teile beeinträchtigt das Fliegen viel mehr, als ein gleich großer Verlust an Fläche an den Seiten des Flügels.

5. Die Typen der Flieger. Eine Gruppierung der Flieger in einzelne Typen wird an die Art und Weise anknüpfen können, wie die Kraft aufgebracht wird, die zum Fliegen nötig ist. Wir können von diesem Gesichtspunkte aus unterscheiden Flieger ohne Flugmotor und solche mit Flugmotor.

5a) Flieger ohne Flugmotor. Die erste Gruppe der Flieger ohne Flugmotor ist klein und wesentlich dadurch interessant, daß sie uns zeigt, auf welchem Wege die hohe Ausbildung des Flugvermögens, das so viele Tiere auszeichnet, erworben worden ist. Es gehören hierher nur der kleine javanische Flugdrache (eine Eidechse) und einige kleine Säugetiere, die als Flugeichhörnchen, Flugbilche und Flugbeuteltiere bezeichnet werden, wodurch bereits ihre verwandtschaftliche Stellung charakterisiert ist. Vom flugtechnischen Standpunkte aus müssen diese Flieger als „Gleitflieger" bezeichnet werden, nicht als „Fallschirmtiere", wie es in der zoologischen Literatur üblich ist. Die Flugleistung besteht nur in dem Abgleiten von einem erhöhten Standpunkte aus und die Kraft, die bei diesem Gleitfluge gegen die Luft ausgeübt wird, leistet das Tier nicht mit eigenen Flugmuskeln, sondern dadurch, daß es kletternd einen erhöhten Standpunkt erreicht, wodurch es potentielle Energie (Arbeitsfähigkeit) aufspeichert, die beim Gleitflug verbraucht wird. Auf demselben Niveau stehen die Gleitflieger-Samen der Pflanzen Bignonia und Zanonia, bei denen die Mutterpflanze, indem sie die Samen hoch über dem Erdboden erzeugt, ihnen die potentielle Energie mitgibt, die sie bei dem einmaligen Gleitfluge zum Boden verbrauchen.

5b) Flieger mit Flugmotor. Die Mehrzahl der Flugtiere besitzt eigene Flugmotoren, mit denen sie die ganze oder einen Teil der Arbeit leisten, die zum Fliegen erforderlich ist.

Beginnen wir mit den Fällen, in denen die Flugmuskeln die einzige Kraftquelle sind, die das Fliegen ermöglicht, so können wir drei Haupttypen unterscheiden: α) Schwingenflieger, β) Schraubenflieger, γ) Drachenflieger.

α) Die Schwingenflieger. In sehr unvollkommener Weise benutzen einige Tiere ihre Segelflächen als Motoren, indem sie dieselben flatternd bewegen. Solche Flatterflieger kennen wir in dem javanischen Flugfrosch, der durch lebhaftes Schlagen mit seinen zu Flughäuten vergrößerten Schwimmhäuten es erreicht, daß sein Gleitflug flacher wird und eventuell spiralige Form annimmt. Zu einem wirklichen Schweben kommt es nicht, dazu sind die Flugmuskeln zu schwach. Es stellt dieses Tier einen Uebergang zwischen den Gleitfliegern und den echten Schwingerfliegern dar. Noch etwas weiter in derselben Richtung ist der Flattermaki entwickelt, der mit ziemlich großen Flughäuten ausgerüstet schon eine beträchtliche Strecke zu durchflattern vermag, aber auch noch kein volles Schweben erreicht.



a



b

Fig 1. Der Flügelschlag der Möve von der Seite (a) und schräg von vorn (b). Nach Marey.

Seine höchste Ausgestaltung hat der Typus der Schwingenflieger in den Vögeln, Fledermäusen und Schmetterlingen gewonnen, die wir auch als Ruderflieger bezeichnen können.

Der Ruderflug besteht in einer Reihe sehr verwickelter rythmisch widerholter Bewegungen der Schwingen, die zu schnell vor sich gehen, um mit Hilfe des Auges analysiert werden zu können. Die Momentphotographie und Kinematographie hat es

ermöglicht, diese Bewegungen im einzelnen zu verfolgen und Figur 1a und 1b zeigen Serien von Aufnahme eines Flügelschlages der Möve nach M a r e y von der Seite und schräg von vorne, aus denen die verschiedenen Stellungen der Schwingen in den einzelnen Phasen des Flügelschlages zu ersehen sind. Eine Analyse der Serienaufnahmen lehrt eine Reihe von Eigenschaften der Flügelbewegung, deren Kenntnis für das Verständnis des Fluges nötig ist:

1. Der Niederschlag des Flügels erfolgt langsamer als der Aufschlag; letzterer dauert vielfach nur halb so lange wie der Niederschlag.

2. Bei vollem Fluge geht der Flügel niemals mit der Oberseite gegen die Luft, sondern wird stets so gedreht, daß der starke Luftstrom, gegen den die Bewegung stets erfolgt, die Unterfläche des Flügels trifft.

3. Die Flügelspitze geht beim Niederschlag relativ zum Vogel von oben hinten nach unten vorne.

4. Beim Niederschlag (etwa $^2/_3$ der Zeit des ganzen Flügelschlages) erfährt der Vogel eine Hebung und Beschleunigung, beim Aufschlag gleichfalls eine Hebung, aber dabei eine Verzögerung.

Der Aufschlag und Niederschlag sind außerdem, wie Figur 1 deutlich erkennen läßt, mit Gestaltsveränderungen des Flügelumrisses verbunden, die durch Bewegungen und Streckungen in den einzelnen Gelenken des Flügels (Ellenbogen, Handwurzel, Fingergelenk) bewirkt werden, wodurch die Bewegungsform außerordentlich verwickelt wird. Diese Gestaltsveränderungen fallen bei den Schmetterlingen fort, deren Flügel nur als Ganzes bewegt werden.

Die Frequenz des Flügelschlages ist bei den verschiedenen Tieren höchst verschieden und nimmt im allgemeinen mit abnehmender Größe der Flieger zu, wie die folgende Tabelle deutlich zeigt.

Zahl der Flügelschläge pro Sek.	
Storch . . . . etwa	2,0
Kranich (und Wildschwan) . .	2,5
Krähe	3,0
Mäusebussard	3,0
Möve mit Wind[1]	3·7
Möve gegen Wind[1]	2,9
Käuzchen	5,0
Fledermaus	5,0
Taube	4,0—6,0
Ente	9,0
Sperling	13,0
Mauersegler	16,0 (geschätzt)

Sehr verschieden ist auch der „Schlagwinkel" bei den verschiedenen Fliegern, d. h. der Winkel, den die Ebenen des Flügels auf der Höhe des Aufschlages und der Tiefe des Niederschlages miteinander bilden.

Um in die große Mannigfaltigkeit der Bewegungsarten der Ruderflieger eine Uebersicht zu bringen, kann man verschiedene Flugtypen unterscheiden. Wir wollen nur die drei charakteristischen Formen hervorheben.

Bei vielen kleinen Vögeln findet sich ein Typus, der nach seinem Hauptvertreter als F i n k e n f l u g bezeichnet wird. Er besteht darin, daß für ganz kurze Zeit ($^1/_4$ bis $^1/_2$ Sekunde) die Flügel mit hoher Frequenz bewegt und dann flach an den Körper gelegt werden. Durch die raschen kräftigen Schläge erteilt sich der Vogel eine erhebliche Beschleunigung schräg nach oben und schießt dann mit angelegten Flügeln, rasch sinkend, eine Strecke weit dahin, um sich durch erneute Flügelschläge wieder zu erheben (Sperling, Schwalbe usw.). Die Flugbahn wird hierdurch eine Wellenlinie. Nur bei kleinen Vögeln mit sehr raschem Flügelschlage macht diese Flugart einen gewandten Eindruck, die größten Formen, die Finkenflug besitzen, die Spechte, bei denen die Pausen zwischen den Flügelschlägen relativ lang sind, können als schlechte Flieger gelten. Ihre Flugbahn ist eine Wellenlinie mit sehr hohen Wellen, der Flug bekommt etwas Eckiges.

Die große Mehrzahl der Schwingenflieger übt den R u d e r f l u g im engeren Sinne aus, wie er durch Taube, Krähe, Storch, Kranich usw. allgemein bekannt ist, und unterbricht die Ruderbewegungen zuweilen, wobei die Flügel ausgebreitet still stehen, und ein Gleitflug ausgeführt wird.

Ein besonderer Typus ist endlich der S c h w i r r f l u g (Kolibriflug).

In seiner klassischen Ausbildung findet er sich unter den Vögeln nur bei den kleinsten, den Kolibris, die vielfach die Dimensionen einer Hummel kaum übertreffen, und deren Flug Aehnlichkeit mit dem Insektenfluge zeigt. Für diesen Flugtypus ist die sehr hohe Frequenz des Schlages der kleinen kaum gewölbten Flügel bezeichnend. Die Bewegung geht so rasch vor sich, daß der Flügel nicht mehr erkannt werden kann, vielmehr nur wie ein Schleier zu sehen ist, der den Leib des Tieres umgibt. Die Schwirrvögel können in ruhender Luft auf einer Stelle stille stehen, was sie z. B. stets tun, um den Blütensaft, ihre Nahrung, zu saugen. Außer den Kolibris sind die Nachtfalter (Schwärmer) als Schwirrflieger zu nennen, von denen der am Tage fliegende Taubenschwanz, ebenso wie die Kolibris, schwirrend über der Blüte steht, die er aussaugt, wobei er pro Sekunde 72 Flügelschläge ausführt.

Eine Andeutung solchen Schwirrfluges

[1]) Wind von der Stärke 3 der 10 teiligen Skala = 5—6 m/sec.

kann man in dem sogenannten „Rütteln" der Falken und einiger anderer Raubvögel sehen, die gleichfalls — beutesuchend — über einem Punkte stille stehen können und dabei ihre Flügel sehr rasch, aber mit geringem Schlagwinkel, bewegen. Auf die Frage, ob der Schwirrflug noch weiter verbreitet ist, werden wir bei der Betrachtung der Schwebens und Kreisens einzugehen haben.

Fig. 2.

β) Die Schraubenflieger. Die Schraubenflieger sind dadurch ausgezeichnet, daß sie keinen Gleitflug ausführen können. Solange sie in der Luft sind, bewegen sie ihre Flügel mit hoher Frequenz, wobei diese Bahnen beschreiben, die als Ausschnitte aus dem Wege einer Luftschraube betrachtet werden können. Insofern können wir von Schraubenfliegern sprechen, obgleich eine wirkliche vollständige Rotation um eine Achse, wie sie unsere Luftschrauben ausführen, bei keinem Tiere vorkommt. Ein scharfer Unterschied dieses Typus gegenüber dem des Schwirrfluges besteht nicht, nur sind die Flügelflächen bei den Schraubenfliegern im allgemeinen noch kleiner, als bei den Schwirrfliegern.

Die typischen Schraubenflieger sind die Bienen und Wespen einerseits, die Fliegen und Mücken andererseits. Von den Libellen, die auch als Schraubenflieger anzusehen sind, haben manche so große Flügel, daß ihnen ein kurzdauerndes Schweben bei ruhig gehaltenen Flügeln möglich ist. Bienen, Wespen und Libellen besitzen zwei Paar Flügel, können also als Doppelschraubenflieger bezeichnet werden. Die Frequenz der Flügelschläge ist meist sehr hoch, z. B. bei der Wespe 110 pro Sekunde, bei der Biene 190 und bei der Hummel 240, so daß diese Tiere brummend oder summend fliegen. Eine nähere Analyse der Flügelbewegungen ist nur bei den Libellen in genügender Weise durchgeführt. Die Serie der Momentaufnahmen Figur 2 nach Bull zeigt vor allem, daß die Vorder- und Hinterflügel nicht wie sonst bei vierflügeligen Insekten gleichzeitig bewegt werden, sondern derart, daß die Vorderflügel etwa in dem Augenblick mit der Vorwärtsbewegung beginnen, wenn die Hinterflügel die Rückwendung anfangen.



Fig. 3. Heuschrecke als Typus eines Drachenfliegers.

Die Fliegen und Mücken besitzen nur ein Paar Flügel, die als Treiblinge (Propeller) dienen. An Stelle der Hinterflügel stehen ein Paar sogenannte Schwingkolben (Halteren), die beim Fluge mit hoher Frequenz bewegt werden, wobei sie den Mantel eines

Kegels durchlaufen. So unscheinbar diese Gebilde sind, ist ihre Bewegung doch eine notwendige Bedingung für das normale Fliegen; entfernt man sie, so überschlagen sich die Tiere in der Luft, fallen nieder und können, trotz normaler Tätigkeit der Vorderflügel, nicht mehr auffliegen. Der Mechanismus der Wirkung dieser kleinen Schrauben ist nicht näher analysiert, jedenfalls aber haben wir in ihnen Stabilisierungs- oder Steuerschrauben zu erblicken, so daß man die Fliegen und Mücken als Steuerschraubenflieger bezeichnen könnte. Die Frequenz des Flügelschlages ist sehr hoch, sie beträgt bei der Stubenfliege 330 pro Sekunde, bei kleinen Mücken kommen wohl noch höhere Frequenzen vor.

γ) D i e D r a c h e n f l i e g e r. Der Drachenflieger, der aus einer Kombination von Segelflächen und Schrauben besteht, ist der einzige bisher erfolgreiche Typus von Flugmaschinen. Im Tierreich ist seine Verbreitung eine recht geringe, nur die Heuschrecken, Grillen und Käfer können hierher gerechnet werden. Bei ihnen dienen die Vorderflügel (s. Fig. 3), die während des Fluges nicht bewegt werden (bei den Käfern die Flügeldecken), als Segelflächen, die Hinterflügel als Treiblinge, die ähnlich wie die Flügel der Bienen und Fliegen, also etwa wie Luftschrauben arbeiten.

Unter den Käfern finden sich Gruppen (z. B. Kurzflügler = Staphiliniden), bei denen die Flügeldecken so klein sind, daß ihnen kaum eine erhebliche Leistung als Segelflächen zukommen dürfte, und diese Formen nähern sich damit dem Typus des Schraubenfliegers. Voraussichtlich haben aber auch die kleinen Flügeldecken noch eine Bedeutung für die Stabilität des Fluges.

6. Das Schweben und Kreisen. In den aufgeführten Flugarten der Ruderflieger, Schraubenflieger und Drachenflieger war die Flugleistung stets eine Leistung der Flugmuskulatur, es wurde in der Tat, wie wir es oben als allgemeine Bedingung hingestellt haben, eine Kraft senkrecht nach unten auf die Luft ausgeübt, die dem Gericht des Fliegers gleich war.

Wir können aber die Bedingung des Schwebens auch umkehren und sagen: ein Körper schwebt, wenn die Luft dauernd auf ihn eine senkrecht nach oben gerichtete Kraft ausübt, die in ihrer Größe dem Gewicht des schwebenden Körpers gleich ist. Es entsteht die Frage, ob es Flugtiere gibt, die eine solche Kraft — die senkrecht nach oben gerichtete Komponente von Luftströmungen — ausnutzen, für die also der W i n d der Flugmotor ist. Wir dürfen nicht erwarten, daß solche Formen dadurch zu erkennen sind, daß sie gar keine Flugmuskeln haben, denn zum Auffliegen, zum Steuern und Landen würden sie dieselben stets gebrauchen, aber wir würden allerdings ein Mißverhältnis zwischen der Flugleistung und der Masse bezw. der Arbeitsfähigkeit der Muskulatur erwarten.

Das ganze Problem der Ausnutzung von Luftströmungen als Kraftquelle beim Fliegen knüpft an die Beobachtung des Schwebens und Kreisens der großen Raubvögel an. Kondor, Adler, Bussard, Geier u. a. können lange Zeit ohne einen Flügelschlag in der Luft verharren, ohne daß sie dabei an Höhe verlieren, wie es beim Gleitfluge der Fall sein würde; ja, diese Vögel können sich sogar ohne einen Flügelschlag emporschrauben. Die Frage, welche Kraft ihnen eine solche Leistung ermöglicht, läßt sich als einfache Alternative formulieren: entweder die Vögel produzieren selber diese zum Schweben und Kreisen notwendige Kraft, oder sie nutzen eine äußere Kraftquelle aus.

Was die erste Möglichkeit anlangt, so kommt die gewöhnliche Art der Kraftentwickelung durch Ruderflug nicht in Betracht, wie die Beobachtung lehrt: die Flügel scheinen still zu stehen. Wenn überhaupt Flugbewegungen ausgeführt werden, so müßten sie von so geringer Amplitude (und hoher Frequenz) sein, daß sie dadurch der Wahrnehmung durch das Auge entgehen. Für die großen Raubvögel, die man meist nur von weitem Schweben sieht, ist diese Annahme nicht unmittelbar zu widerlegen, wohl aber für eine Reihe anderer Schwebeflieger, die aus nächster Nähe beobachtet werden können, für Möven und Albatroß. Solche Flieger sind aus Entfernungen von nur etwa 1 m öfters genau beobachtet worden, ohne daß die geringste Andeutung eines solchen hypothetischen Schwirr- oder Zitterfluges zu bemerken war. Auch bei etwas größerer Entfernung müßte eine derartige Bewegung, die nur bei sehr hoher Schlagfrequenz die nötigen Kräfte liefern könnte, durch das Ohr als ein Brausen oder Brummen wahrgenommen werden. Auch diese Erscheinung fehlt, und das Rauschen, das gelegentlich bei schwebenden oder gleitenden Vögeln wahrgenommen worden ist, kommt offenbar nur in derselben Weise zustande, wie das Rauschen eines Segels, wenn es hart an den Wind gestellt ist.

Eine weitere Widerlegung der Anschauung daß das Schweben und Kreisen mit Hilfe von Muskelarbeit geleistet würde, werden wir aus stoffwechselphysiologischen Gründen noch bei der Lehre von der Flugarbeit ableiten können.

Wenn aber die zum Schweben erforderliche Kraft nicht von dem Vogel selber aufgebracht wird, so muß er sie von außen entnehmen, und als äußere Kraftquelle kommt nur die bewegte Luft in Betracht.

Fliegt ein Vogel in einer homogenen (also wirbelfreien) horizontalen Luftströmung, so nimmt er sehr schnell deren Geschwindigkeit an, und ist damit relativ zur umgebenden Luft in R u h e, er erfährt keine B e s c h l e u n i g u n g mehr, d. h. es ist keine Kraft vorhanden, die zum Schweben ausgenutzt werden könnte. Nun gibt es aber in der Nähe des Erdbodens, in den unteren 100 m (oder mehr) des Luftmeeres nirgends homogene horizontale Luftströmungen, vielmehr wechselt die Geschwindigkeit des Windes an demselben Punkte oft von Sekunde zu Sekunde ganz beträchtlich und an verschiedenen Orten herrschen gleichzeitig ganz verschiedene Windgeschwindigkeiten. Es würde also ein Flugtier sehr häufig eine Relativgeschwindigkeit gegen die Luft erhalten, eine B e s c h l e u n i g u n g (positive oder negative), und könnte vermöge der schräg gestellten Segelflächen die senkrecht nach oben gerichtete Komponente dieser Kraft zum Schweben ausnutzen. Am günstigsten werden aber die Bedingungen zum Schweben, wenn aufsteigende Luftströme vorhanden sind. In einem Bezirk solcher Luftströme können die Schwebeflieger sogar ohne Kreisen auf der Stelle still stehen.

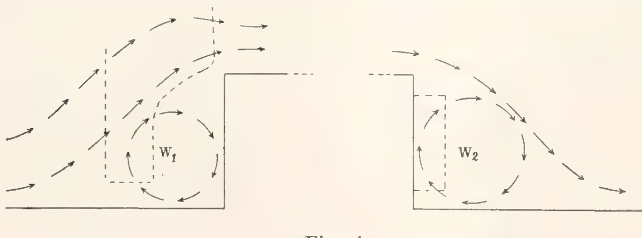


Fig. 4.
——→ Windrichtung: W_1 und W_2 Wirbel.
.... Orte aufsteigender Luftströme.

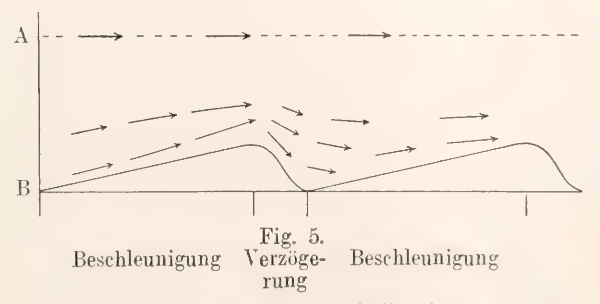


Fig. 5.
Beschleunigung Verzöge-rung Beschleunigung

——→ Richtung und Geschwindigkeit des Windes. A Zone der homogenen Strömung mit mittlerer Geschwindigkeit. B Zone der beschleunigten und verzögerten Strömung.

Die Beobachtungen an der Erde und besonders jene im Freiballon lehren übereinstimmend, daß vertikale Luftströme in der Natur gar nicht selten sind, und daß sie an ganz bestimmten Stellen stets vorkommen.

Stellt sich dem Wind ein Hindernis entgegen (ein Haus, ein Wald usw.), so bilden sich an der Luv- (= Wind-) und Lee- (= Windschatten-)Seite ganz bestimmte Strömungsbilder aus, die Figur 4 schematisch zeigt. Die Luft steigt auf der Luvseite empor, wobei sich vor dem (senkrecht aufsteigenden) Hindernis ein kleiner Wirbel (W_1) bildet, hier haben wir also einen aufsteigenden Luftstrom. Auf der Leeseite bildet sich ein entsprechender absteigender Luftstrom aus und wiederum ein Wirbel (W_2), dessen aufsteigender Teil an der Rückseite des Hindernisses emporsteigt. Wird das Hindernis von einem Berge gebildet, so fallen die Wirbel W_1 und W_2 mehr oder weniger vollständig fort und die Luft bewegt sich auf der Luvseite aufsteigend, auf der Leeseite absteigend. Im Ballon hat man häufig Gelegenheit, diese auf- und absteigende Bewegung mitzumachen, und ich habe oft Vertikalgeschwindigkeiten von 1 m/sec, gelegentlich auch solche von 2 m/sec gemessen.

Mit der Aufzählung der Stellen, an denen aufsteigende Luftströme vorkommen, haben wir bereits die bevorzugten Orte des Schwebens und Kreisens genannt: Am Walde, über den Baumkronen, an der Luvseite, unterhalb derselben und dicht am Waldrande auf der Leeseite, über den Klippen am Meer oder im Hochgebirge, an der Luvseite jedes Hügels schweben und kreisen Weihe, Bussard, Möve, Adler usw. Eine besondere Betrachtung verdienen noch die Windverhältnisse unmittelbar über der Oberfläche des Meeres. Liegt das Meer spiegelglatt, wellenlos da, so wäre die Bedingung für eine homogene horizontale Luftströmung gegeben. Sowie aber der Wind über die Meeresfläche streicht, erzeugt er Wellen und die Homogenität ist gestört. Da die Wellenberge stets langsamer fortschreiten, als der Wind, kann man die Sache so betrachten, als stünden die Wellen still und der Wind striche mit der Geschwindigkeit (Wind—Welle) über sie. In einer gewissen Höhe über den Wellen (etwa in ihrer 2 bis 3 fachen Höhe) würde homogene Strömung herrschen, darunter aber erfährt der Wind an jedem Wellenberge eine Beschleunigung, dahinter eine Verzögerung,

wie Figur 5 schematisch zeigt. Diese Zone wird nun zum Schweben von Möve und Albatroß in ausgiebigster Weise benutzt, und außerdem tummeln sich gerade hier die fliegenden Fische. Aus der schwach entwickelten Flugmuskulatur derselben ist zu entnehmen, daß sie kaum im Schwirrfluge der sehr viel Kraft verlangt (siehe unten), so weite Strecken durchfliegen können, wie die Beobachtung ergibt (100 bis 200 m). Einen Ruderflug führen sie nicht aus, denn die Flügelflossen scheinen still zu stehen. Andererseits kann der Flug auch kein einfacher Gleitflug sein, bei dem sich die Fische im Emporschnellen die Geschwindigkeit erteilen, die sie im Gleitfluge verlieren, denn ihr Sinkverhältnis (s. o.) ist mit 1: 7 sicher schon zu hoch angenommen. Durch das Emporschnellen aus dem Wasser gelangen sie aber in die Zone der beschleunigten und verzögerten Luftströmung und können in ihr eine, oft beträchtliche Strecke schweben.

Zu erwähnen wären endlich als bevorzugte Stellen des Schwebens noch bestimmte Stellen, neben und über den Schiffen, die Möve und Albatroß aufsuchen, und an denen sie halbe Stunden lang ohne einen Flügelschlag verharren können, indem sie mit der Geschwindigkeit des Schiffes gleiten und durch die am Schiffskörper und seinen Aufbauten nach oben abgelenkten Luftströmungen im Schweben erhalten werden. Das klassische Beispiel langdauernden Schwebefluges, das Alexander von Humbold und Darwin beobachtet haben, ist das des Kondors über den Andengipfeln, über denen stets bedeutende aufsteigende Luftströme herrschen.

Von der Größenordnung der vertikalen Luftströme, die zum Schweben notwendig sind, kann man sich eine ungefähre Vorstellung machen, wenn man die Schwebegeschwindigkeit und das Sinkverhältnis eines Fliegers kennt. Setzen wir letzteres im Mittel auf 1: 8 an, so würde ein Kohlweißling schon in einem vertikalen Luftstrom von etwa 16 cm/sec schweben können, die Schwalbe würde 73 cm/sec gebrauchen, der Bussard etwa 85 und selbst bei Schwebegeschwindigkeiten von 10 m/sec, wie sie die Schwebeflieger wohl nie überschreiten, würde eine vertikale Strömung von 1,25 m/sec das Schweben, eine stärkere das Emporsteigen ohne Flügelschlag ermöglichen.

Wir können also zusammenfassend sagen: die Kraft, die zum Schweben und Kreisen nötig ist, gewinnen die Flugtiere durch die Beschleunigungen, die sie in unregelmäßiger Luftströmung erfahren und besonders durch Ausnutzung vertikaler aufsteigender Luftströme.

7. Die Flugarbeit. Exakte Bestimmungen der Größe der Flugarbeit fehlen vollständig. Man hat versucht, aus der Bewegung des Flügels, aus dem Wege, den sein Druckmittelpunkt zurücklegt, die Größe der Sekundenarbeit zu berechnen, doch geben diese Rechnungen prinzipiell unrichtige Werte, da die Gestaltsveränderung des Flügels beim Schlage, sowie überhaupt alle charakteristischen Einzelheiten der Flügelbewegung in dieser Rechnung keine Berücksichtigung finden können.

Wenn man ohne direkte Messungen sich ein Bild von der Größe der Flugarbeit machen will, so kann man an die Erfahrungen der Stoffwechselphysiologie anknüpfen. Die Nahrung, deren chemische Energie die Quelle der Muskelkraft ist, wird im Körper oxydiert und liefert dabei 1. die Kräfte, die zur Unterhaltung des Lebensbetriebes nötig sind, wenn keine Arbeit nach außen geleistet wird, im sogenannten „Grundumsatz" und 2. die Kräfte, die als äußere Arbeit erscheinen, im sogenannten Leistungszuwachs.

Die Größe des Grundumsatzes ist für eine Reihe von Vögeln mit hinreichender Genauigkeit bekannt. Wir wissen nun, daß im Leistungszuwachs für je 1 mkg Arbeit, das nach außen geleistet wird, eine Energiemenge umgesetzt werden muß, die rund 3 mkg äquivalent ist. Wir wissen ferner aus den Erfahrungen am Säugetier, daß die Größe des Leistungszuwachses zwischen Werten schwankt, die etwa dem Grundumsatze gleich sind (bei kräftiger körperlicher Arbeit), bis zu Werten, die ihn um das Fünffache übertreffen (bei extremsten sportlichen Leistungen). Unter der sehr wahrscheinlichen Annahme, daß diese Verhältnisse auch bei Vögeln gelten, können wir danach ausrechnen, wie groß die Flugarbeit bei mittlerer und maximaler Anstrengung sein kann.

Für die Taube ergibt sich dabei als Leistung für 1 kg Gewicht unter den verschiedenen Bedingungen:

1. Leistungszuwachs = dem Grundumsatz: 1 kg leistet 0,38 mkg/sec
2. Leistungszuwachs = dem doppelten Grundumsatz: 1 kg leistet 0,77 mgk/sec.
3. Leistungszuwachs = dem fünffachen Grundumsazt 1 kg leistet 1,91 mgk/sec.

Der letzte Wert würde die maximale Leistung bedeuten, die für längere Zeit (etwa einige Stunden) aufgebracht werden könnte. Diesen Grenzwert kann man nun andererseits aus Arbeitsversuchen mit der Flugmuskulatur bestimmen (Gildemeister) und die Tatsache, daß solche Versuche als Grenzleistung für 1 kg Taube etwa 2,0 mkg/sec ergeben, was gut mit den aus dem Stoffwechsel errechneten Werten übereinstimmt, zeigt die Anwendbarkeit der Rechnungsmethode.

Wir dürfen ansetzen, daß 1 kg Taube im gewöhnlichen Fluge etwa 0,5 mkg/sec leistet, bei maximaler Anstrengung etwa 2,0 mkg/sec. Bei einem Gewicht des Tieres von 0,35 kg beträgt die Leistung 0,176 mkg/sec oder $^1/_{426}$ PS. Wichtiger fast als die Kenntnis der absoluten Größe der Flugarbeit ist diejenige ihrer Abhängigkeit von der absoluten Größe der Tiere.

Die Größe des Stoffwechsels und damit auch jene der Leistungen, die nach außen vollbracht werden können, sind nicht gleich, wenn man sie pro 1 kg der verschiedenen Tiere berechnet, vielmehr ist nahezu konstant die Umsatzgröße pro Einheit der Oberfläche der Tiere. Es verbrauchen an Sauerstoff für 1 qm Oberfläche einerseits, für 1 kg Körpergewicht andererseits die verschiedenen Vögel folgende Mengen:

Tier	Gewicht	Sauerstoffverbrauch	
	g	pro kg Stunde	pro m² Stunde
Sperling . .	22	9,592	25,9
Taube . . .	325	3,020	20,0
Ente . . .	1 740	2,220	25,8
Gans . . .	18 400	0,750	18,8
Strauß . .	150 000	0,55	28,1

Rechnet man nun in derselben Weise wie für die Taube die Leistungen pro 1 kg Gewicht aus, so ergibt sich, daß die Leistungsfähigkeit mit zunehmender Größe der Flugtiere abnimmt. Die mittlere Leistung (Leistungszuwachs = 1,5 Grundumsatz) beträgt pro 1 kg Gewicht beim:

Kolibri	2,1 mkg/sec	Storch	0,32 mkg/sec
Schwalbe	1,56 ,,	Albatroß	0,19 ,,
Taube	0,50 ,,	Kondor	0,13 ,,

Die Erkenntnis, daß die Leistungsfähigkeit der kleinen Flugtiere pro Einheit des Gewichts, das in der Luft erhalten werden soll, viel größer ist, als jede der großen, erklärt eine Reihe typischer Unterschiede in der Art des Fliegens bei großen und kleinen Fliegern. Den Schwirrflug (s. o.) können nur kleine Formen ausführen, er erfordert sehr hohe Leistungen pro Gewichtseinheit, auch der Finkenflug mit seinen sehr frequenten Schlägen stellt hohe Anforderungen, denen nur kleinere Flieger gerecht werden können. In den auffällig geringen Werten der Leistungsfähigkeit der großen Flieger erkennen wir das Mißverhältnis zwischen Flugleistung und Leistungsfähigkeit der Muskulatur, das wir bei Schwebefliegern erwarteten (s. o.), die als Kraftquelle in ausgiebigem Maße den Wind benutzen, und so mit geringer Muskelanstrengung, die wesentlich beim Auffliegen aufgewendet werden muß, fliegen können. Eine Erklärung des Schwebefluges als Schwirr- oder Zitterflug (s. o.) erscheint gegenüber dem großen Kraftaufwand, den eine solche Flugart erfordern würde, für die großen typischen Schwebeflieger völlig ausgeschlossen.

Bei den Insekten, deren Leistungen als Schraubenflieger noch höher zu veranschlagen sind als jene der Schwirrvögel (Kolibris), ist in der Tat die Leistungsfähigkeit, aus dem Stoffwechsel berechnet, noch wesentlich größer. Die Biene würde im Mittel etwa 5,5 mkg/sec pro 1 kg Gewicht leisten können, d. h. 2,6 mal so viel wie der Kolibri.

Die Flugarbeit ist am geringsten bei hohem Luftdruck, sie wächst umgekehrt proportional der Wurzel aus der Dichte der Luft, d. h. wenn wir ihre Größe bei 0° und 760 mm als Einheit ansetzen, beträgt sie in 3000 m Höhe schon 1,2, in 5500 m 1,42.

8. Die Flugleistungen. Die Geschwindigkeit des Fluges ist vielfach überschätzt worden. Es ist schwierig, genaue Daten über ihn zu erhalten. Am leichtesten gelang es bei der Brieftaube, für die eine Eigengeschwindigkeit von etwa 19 m/sec im vollen Fluge anzunehmen ist. Bei einem Brieftauben-Wettfliegen, an dem eine zahme Schwalbe teilnahm, flog letztere dreimal so schnell wie die Tauben, so daß für sie die höchste bisher überhaupt an Flugtieren beobachtete Geschwindigkeit von etwa 57 m/sec = 205 km in der Stunde anzunehmen wäre. Genaue Bestimmungen der Geschwindigkeit des freien Streckenfluges verschiedener Vögel, die von der Vogelwarte Rositten angestellt worden sind, haben ergeben, daß die meisten Werte zwischen 13,9 m/sec (Nebelkrähe, Möve) und 17,1 m/sec (Dohle) liegen, und zwar fliegen kleine Vögel (z. B. Zeisig 15,5 m/sec) nicht wesentlich langsamer als größere (Wanderfalke 16,45 m/sec, Saatkrähe 14,5 m/sec). Besonders langsam flog der Sperber mit 11,5, besonders schnell der Star mit 20,6 m/sec. Die Biene fliegt etwa 10 m/sec, Maikäfer kommen gegen Wind von etwa 6 bis 8 m/sec (Windstärke 4 der 10teiligen Skala) kaum mehr vorwärts, am langsamsten fliegen — entsprechend ihrer geringen Flächenbelastung — die Tagfalter.

Auf die Frage, welche Strecken Vögel ohne Unterbrechung durchfliegen können, ist eine exakte Antwort kaum möglich, doch sind die Angaben, daß das Blaukehlchen in einer Nacht ohne Rast von Aegypten bis Helgoland oder der amerikanische Goldregenpfeifer (Charadrias virginicus) von Labrador bis Südamerika, d. h. etwa 5000 km ohne Unterbrechung fliegen könne, in das Reich der Fabel zu verweisen: der Stoffbestand und der intensive Grundumsatz dieser relativ kleinen Vögel lassen solche Leistungen, selbst bei weitgehender Unterstützung durch günstige Winde, aus stoffwechsel-

physiologischen Gründen ausgeschlossen erscheinen.

Eine Strecke von etwa 1000 km ist wohl das Höchste, was als Flugleistung ohne Unterbrechung, d. h. ohne Nahrungsaufnahme möglich erscheint (bei kleinen Vögeln z. B. Zwergzeisig sogar noch erheblich weniger), und keine gut beglaubigte Beobachtung erfordert die Annahme größerer Leistungen. Der Wanderflug, auf dem nach älteren Annahmen so besonders erstaunliche Flugleistungen vorkommen sollten, geht sogar vielfach recht langsam vor sich. In das Reich der Fabel gehören auch die Angaben, daß der Wanderflug in großen Höhen von 10 000 bis 15 000 m erfolge: der Wanderflug, wie jeder andere Flug, erfolgt stets unterhalb der untersten Wolkendecke, bezw. wenn die Wolken bis zur Erde reichen, unmittelbar über dem Erdboden. Große relative Höhen werden — wie besonders Beobachtungen im Ballon lehren — nur höchst selten von Vögeln aufgesucht, die schon in wenigen hundert Metern Höhe nur als Ausnahme zur Beobachtung gelangen.

Bei der mit der absoluten Höhe zunehmenden Flugarbeit ist es verständlich, daß nur Schwebeflieger, die die Kraft von Luftströmungen ausnutzen, in bedeutende Höhen gelangen wie der Adler oder der Kondor, für welch letzteren als sicher gelten kann, daß er eine Höhe von 7900 m erreicht, eine Höhe, in der der Luftsdruck nur 280 mm Hg, der Sauerstoffdruck nur 56 mm beträgt und die Flugarbeit für den Ruderflug (den aber der Kondor in diesen Höhen auch nicht ausübt) das 1,64 fache derjenigen in den unteren Luftschichten beträgt.

Literatur. **Prechtl**, *Untersuchungen über den Flug der Vögel, Wien 1846.* — **Müllenhoff**, *Die Größe der Flugflächen. Pflügers Arch. Bd. 30 1884.* — **Strasser**, *Ueber den Flug der Vögel, Jena 1885.* — **A. v. Parseval**, *Die Mechanik des Vogelfluges, Wiesbaden 1889.* — **O. Lilienthal**, *Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst, Berlin 1889.* — **Marey**, *Le vol des oiseaux, Paris 1890.* — **W. Winter**, *Der Vogelflug, München 1894.* — **K. Milla**, *Die Flugbewegung der Vögel, Wien 1895.* — **Exner**, *Ueber das „Schweben" der Raubvögel. Pflügers Archiv Bd. 114 (1906) und 117 (1907).* — **L. Prandtl**, *Betrachtungen über das Flugproblem. Denkschrift der Ila zu Frankfurt a. M. Bd. 1 1909.* — **A. Pütter**, *Die Entwickelung des Tierfluges. Ebenda Bd. 1 1909.* — **R. Wachsmuth**, *Kinematographische Aufnahmen eines Tierfluges. Ebenda Bd. 2 1909.* — **M. Gildemeister**, *Notizen zum Problem des Vogelfluges. Pflügers Archiv Bd. 135 1910.* — **F. W. Lanchester**, *Aerodynamik. Ein Gesamtwerk über das Fliegen. Englisch. London Bd. 1 1907, Bd. 2 1908. Deutsch von C. und A. Runge, Leipzig und Berlin. Bd. 1 1909, Bd. 2 1911.*

A. Pütter.

Bewegungen der Pflanzen.

1. Allgemeines. 2. Vitale Bewegungen: a) Energetik der vitalen Bewegungen. b) Formen und Mechanismen der vitalen Bewegungen: α) Bewegungen einzelliger Pflanzen und Bewegungen des Zellinhaltes: aa) Amöboide Bewegung. bb) Plasmaströmung in behäuteten Zellen. cc) Kontraktile Vakuolen. dd) Bewegung des Zellkerns. ee) Bewegung der Chromatophoren. ff) Bewegung der Desmidiaceen. gg) Bewegung der Diatomeen. hh) Schwimmbewegungen vermittels Geißeln und Cilien. β) Bewegungen mehrzelliger Pflanzen: aa) Krümmungen und Torsionen: αα) Nutationskrümmungen. ββ) Variationsbewegungen. γγ) Torsionen. bb) Schleuderbewegungen. 3. Physikalische Bewegungen: a) Hygroskopische Bewegungen. b) Kohäsionsbewegungen.

1. Allgemeines. Es gab eine Zeit, wo man bei der Aufzählung der unterscheidenden Merkmale zwischen Pflanze und Tier die pflanzliche Bewegungslosigkeit der tierischen Beweglichkeit gegenüber mit Nachdruck hervorhob.

Diese scharfe Trennung erwies sich in der Folge als unhaltbar und heute wissen wir, daß auch die Pflanzen mannigfaltige Bewegungen ausführen. So gibt es eine große Zahl einzelliger, pflanzlicher Organismen, die sich frei vom Ort bewegen, sich im Prinzip verhalten, wie die meisten Tiere. Ich will bloß kurz erinnern an die Volvocineen unter den Algen, an die vielen beweglichen Bakterien, an das Plasmodium der Myxomyceten und an die Schwärmsporen, die als bewegliche Zustände vielen sonst nicht freibeweglichen Algen und Pilzen eigen sind (vgl. die Artikel „Algen" und „Pilze").

Den höheren Pflanzen, die mit ihren Wurzeln im Boden fest verankert sind, ist diese freie Ortsbeweglichkeit abhanden gekommen. Aber auch diese Pflanzen sind nicht das starre System, das flüchtige Betrachtung aus ihnen zu machen geneigt ist. Die Lage ihrer Organe im Raume ist nicht unverrückbar fixiert. Durch zahlreiche Untersuchungen wurde dargetan, daß Wurzel, Stengel, Blatt und Blüte befähigt sind, sich mit Hilfe mannigfacher Krümmungen und Drehungen im Raume zu orientieren. Das ist biologisch von Bedeutung, da dadurch die festgewurzelte Pflanze auch ohne Ortsbewegung in eine günstigere, ihr besser zusagende Lage gelangen kann. Auffällig sind diese Bewegungen freilich nicht, da sie, wenn wir von einigen Ausnahmen absehen, recht langsam erfolgen im Vergleich zu tierischen Bewegungen. So braucht beispielsweise ein Stengel mehrere Stunden, um sich rechtwinklig zu krümmen, ja sogar mehrere Tage, wenn er dicker ist. Vergleicht man diese Geschwindigkeiten mit der Schnelligkeit, womit z. B. unser Arm sich im rechten Winkel krümmen kann, so wird man sich nicht mehr wundern, daß man erst nach und

nach die Beweglichkeit der festsitzenden Pflanzen richtig erkannt hat.

Immerhin gibt es auch hier Ausnahmen. So sind die raschen Senkbewegungen, die die Blätter der Sinnpflanze (Mimosa pudica) nach leiser Berührung oder Erschütterung ausführen, schon früh aufgefallen und als Ausnahmen bestaunt worden. Sie stehen aber trotzdem, wie später noch gezeigt wird, in keinem prinzipiellen Gegensatz zu den sonstigen pflanzlichen Bewegungen, von denen viele im Mechanismus mit den Bewegungen der Sinnpflanze übereinstimmen, aber langsamer verlaufen.

Wenn wir, nach diesen einleitenden Bemerkungen, zur näheren Betrachtung der pflanzlichen Bewegungen übergehen wollen, so müssen wir vor allem zwei große Gruppen unterscheiden. Es gibt Bewegungen, die ohne die Lebenstätigkeit der Pflanze zustande kommen, die nicht bloß an lebenden, sondern in gleicher Weise auch an toten Pflanzen und Pflanzenteilen auftreten und die man deshalb als physikalische Bewegungen bezeichnet. Ihnen stehen gegenüber die Bewegungen, die mit der Lebenstätigkeit der Pflanze untrennbar verknüpft sind, die nicht mehr ausgeführt werden können, sobald die Pflanze tot ist. Diese Bewegungen bezeichnet man als vitale Bewegungen.

Während die physikalischen Bewegungen vielfach von großer biologischer Bedeutung sind, so bieten sie physiologisch doch ein geringeres Interesse. Wir wollen deshalb im folgenden die dem Organismus wirklich eigentümlichen vitalen Bewegungen zuerst behandeln.

2. Vitale Bewegungen. So verschieden die Formen, die Mechanismen und die veranlassenden äußeren Umstände der vitalen Bewegungen sein mögen, so ist doch allen gemeinsam, daß sie, genau wie jede rein physikalische Bewegung nur ausgeführt werden können, wenn die nötige Kraft vorhanden ist. So wollen wir denn erst einige allgemeine Bemerkungen über die Energetik vorausschicken und nachher die Behandlung der verschiedenen Formen und Mechanismen folgen lassen.

2a) Energetik der vitalen Bewegungen. Halten wir einen dünnen Draht in horizontaler Lage am einen Ende fest, so senkt sich das freie Ende etwas unter dem Einfluß der Schwerkraft, die danach strebt den Draht nach abwärts zu ziehen. Wenn wir das gleiche Experiment mit einem Pflanzenstengel wiederholen, indem wir z. B. den Topf, worin die Pflanze wurzelt, horizontal legen, so senkt sich das freie Ende des Stengels vorerst ebenfalls etwas, genau wie der Draht. Bald aber beobachten wir etwas Merkwürdiges. Das freie Ende des Sprosses beginnt sich aufwärts zu krümmen, also sich in einer Richtung zu bewegen, die der Zugrichtung der Schwerkraft nach unten entgegengesetzt ist. Diese Krümmung, und damit die Bewegung, kommt erst zum Stillstand, wenn das Sproßende wieder senkrecht steht und mit der Basis des Sprosses einen rechten Winkel bildet.

Aus diesem Experiment ist als das Wichtigste zu entnehmen, daß der Sproß sich aktiv nach aufwärts krümmte und daß er nicht etwa rein passiv gekrümmt wurde durch eine äußere Kraft. Hätte sich der Stengel passiv und nicht aktiv verhalten, so wäre er notwendigerweise durch die Schwerkraft nach abwärts gekrümmt worden, da eine Aufwärtskrümmung den physikalischen Gesetzen gemäß unmöglich wäre.

Analog, wie in unserem Beispiel, verhält es sich auch mit allen übrigen vitalen Bewegungen. Sie kommen immer durch aktive Tätigkeit der Pflanze zustande. Die vitalen Bewegungen sind somit Arbeitsleistungen der lebenden Pflanzen.

Es ist nun natürlich von Interesse etwas Näheres über die Größe der pflanzlichen Arbeitsleistungen zu erfahren und man hat versucht die Arbeit, die bei der Ausführung gewisser Krümmungen geleistet wird, zahlenmäßig festzustellen.

Wie man das gemacht hat, sei im folgenden auseinandergesetzt.

Wir wollen von den Verhältnissen ausgehen, wie sie bei den Stengeln der Gramineen vorliegen. Diese Stengel haben eine morphologische Eigentümlichkeit, sie sind geknotet. Die Knoten haben eine besondere physiologische Bedeutung, was sehr schön hervortritt, wenn ein Grashalm horizontal gelegt wird. Dann tritt im oberen Stengelteil ganz normal eine Aufwärtskrümmung ein, die aber nur von bestimmten Zonen, eben den Knoten, ausgeführt wird. Die Stengelteile, die zwischen den Knoten liegen, die Internodien krümmen sich nicht, sie werden vielmehr durch die Krümmung der Knoten rein passiv hochgehoben. Meistens treten mehrere Knoten in Aktion, wir wollen uns aber der Einfachheit wegen erst einmal vorstellen, daß die Krümmung bloß durch einen einzigen Knoten ausgeführt werde. In dem Fall können wir den Stengelteil, der sich aufwärts bewegt, betrachten als einen Hebelarm, dessen eines Ende das freie Sproßende darstellt, während sein anderes Ende, um das er drehbar ist, durch den Knoten markiert wird. Dieser Hebelarm hat nun selbstverständlich ein bestimmtes Eigengewicht, und die Arbeitsleistung, die durch die Drehung des Hebelarms aus der Horizontallage nach oben zustande kommt, besteht gerade in der Hebung dieses Eigengewichtes. Um die Arbeitsleistung zahlenmäßig ausdrücken zu können, brauchen wir nun bloß aus dem Eigengewicht

das statische Moment zu berechnen, was auf folgende Weise leicht geschehen kann.

Die Kräfte, die den Hebelarm nach abwärts ziehen, sind alle einander parallel, sie kombinieren sich also zu einer Resultierenden, die gleich der Summe sämtlicher Einzelkräfte ist. In unserem Fall aber heißt das nichts anderes, als daß die Resultierende gleich ist dem Gesamtgewicht des Hebelarmes. Wie aus der Physik bekannt ist, greift diese Resultierende in einem bestimmten Punkt an, der als Schwerpunkt bezeichnet wird und der kurz zu definieren ist als der Punkt, der unterstützt werden muß, um den Körper am Fallen zu hindern.

Wir können uns deshalb den pflanzlichen Hebelarm auch so vorstellen, als ob das Gesamtgewicht im Schwerpunkt konzentriert wäre, woraus sich weiter entnehmen läßt, daß das statische Moment gleich ist dem Produkt aus dem Abstand des Schwerpunktes vom Drehpunkt (also vom Knoten) mal dem Eigengewicht des Hebels. Da die Hebelarme bei verschiedenen Pflanzen sehr verschieden lang sind, hat man, um die einzelnen Werte vergleichbar zu machen, die Höhe der Last auf einen Hebelarm von gleicher Länge umgerechnet. Im folgenden seien einige Werte mitgeteilt.

Statische Momente für einen Hebelarm von 1 mm Länge.

Lupinus albus (Hypokotyl) 32 bis 53 g
Cucurbita pepo (Hypokotyl) 102 bis 345 g
Tulipa (Blütenstengel) 464 bis 766 g
Hyacinthus orientalis (Blütenschaft) 3447 bis 6165 g
Zea mais 36015 bis 190650 g

Aus diesen Zahlen ist zu ersehen, daß die Arbeitsleistungen der Pflanzen bei Krümmungen zum Teil recht hohe sind. Mit noch größerem Respekt aber betrachten wir die Pflanze, wenn wir erfahren, daß die Krümmungen vielfach auch dann ausgeführt werden, wenn das Eigengewicht und damit das statische Moment beträchtlich erhöht werden. So wurde z. B. die Krümmung bei Lupinus albus erst gehindert, wenn das statische Moment auf das 6 bis 7fache erhöht wurde. Aehnlich verhalten sich auch andere Pflanzen, während in manchen Fällen bloß eine 2 bis 3fache Erhöhung ertragen wurde.

Aus alledem geht hervor, daß der Pflanze zur Ausführung ihrer Bewegungen beträchtliche Energiemengen zur Verfügung stehen müssen, denn ohne Energie natürlich keine Bewegung. Die Quellen dieser Energie müssen, da die Pflanze ihre Bewegungen aktiv ausführt, in ihr selbst vorhanden sein und wir haben uns zu fragen, welches diese Quellen sind.

Bei der Beantwortung dieser Frage wird man in erster Linie geneigt sein, an den Oxydationsprozeß in der Pflanze, an die Atmung zu denken, in Anlehnung an die Verhältnisse in der Dampfmaschine. Zwei wichtige Vergleichspunkte zwischen der Pflanze und der Dampfmaschine fallen in der Tat sofort auf. In beiden Fällen ist die äußere Arbeitsleistung dieselbe, eine Bewegung. Dabei ist es im Prinzip gleichgültig, ob diese Bewegung, wie bei der Pflanze in einer Krümmung besteht, oder ob es sich um eine Ortsbewegung handelt, wie bei der Lokomotive. In beiden Fällen findet andererseits eine Befreiung chemischer Energie durch Oxydation statt, wobei in der Pflanze Kohlehydrate, in der Dampfmaschine Steinkohlen verbrannt werden.

Auf die Uebereinstimmung in den zwei soeben erwähnten Punkten gründet sich die da und dort geäußerte Meinung, daß nicht nur in der Dampfmaschine, sondern auch in der Pflanze die Energie, die zur Ausführung der Bewegungen nötig ist, durch den Oxydationsprozeß geliefert werde. Bei näherem Zusehen aber zeigt sich, daß wir diesen Schluß doch nicht so ohne weiteres ziehen dürfen. Freilich, in bezug auf die Dampfmaschine besteht ja kein Zweifel. Da übersehen wir den Zusammenhang zwischen Oxydation und Bewegung mit aller wünschenswerten Deutlichkeit. Es wird ja die chemische Energie durch die Oxydation aktiviert, bleibt aber nicht als chemische Energie bestehen, sondern wird in Wärme umgewandelt. Die Wärme selbst wird wieder weiter umgesetzt in Dampfspannung, die ihrerseits in Bewegungsenergie übergeht.

Diese klare Einsicht in die energetischen Transformationen, wie wir sie für die Dampfmaschine besitzen, fehlt uns für die Pflanze völlig. Ob in der Pflanze überhaupt chemische Energie in Bewegungsenergie umgesetzt wird, ist bis jetzt gänzlich unklar. Wir wissen allerdings, daß zahllose Bewegungen ohne Atmung nicht vor sich gehen können. Daraus dürfen wir aber noch nicht den Schluß ziehen, daß auch in der Pflanze, die chemische Energie, sei es nun direkt oder indirekt in mechanische Energie umgewandelt werde. Die Abhängigkeit mancher Bewegungen von der Atmung beweist bloß, daß die Atmung für diese Bewegungen unerläßliche Bedingung ist, ohne daß wir etwas Näheres darüber aussagen können, worauf diese Unerläßlichkeit beruht.

Fassen wir kurz zusammen, so können wir sagen: Es ist möglich, daß in manchen Fällen in der Pflanze zwischen Oxydation und Bewegung ähnliche Beziehungen herrschen, wie in der Dampfmaschine, wir haben aber bis jetzt keinerlei Anhaltspunkte, daß dem wirklich so ist.

Angesichts dieser negativen Erkenntnis ist es um so interessanter, daß wir bei manchen

pflanzlichen Bewegungen nachweisen können, daß sie nicht durch chemische, sondern durch eine andere Energieform verursacht werden. Es werden nämlich vielfach Bewegungen durch osmotische Energie ausgeführt. Das Prinzip dieser Erscheinung wollen wir uns kurz klarmachen.

Die Zelle ist ein osmotisches System. Die kleinsten Teilchen der im Zellsaft gelösten Stoffe, wie Zuckerarten, Salze usw. haben, wie das bei allen gelösten Körpern zutrifft, das Bestreben, sich voneinander zu entfernen. Sie wandern deshalb auseinander und treffen schließlich auf das Protoplasma, das wir uns der Einfachheit halber als einen gleichmäßig gebauten Wandbelag vorstellen wollen. Das Plasma selbst ist mit Wasser durchtränkt und auch jenseits des Plasmas ist in der Cellulosehaut Wasser vorhanden. Die Bedingung für das Weiterwandern der Moleküle des gelösten Körpers ist also gegeben. Trotzdem aber tritt ein Hinauswandern aus der Zelle nicht ein, da das Plasma die Moleküle nicht durchläßt, sie gewissermaßen wie ein Filter, das in einem Strome ausgespannt ist, zurückhält. Die Bewegung der Moleküle wird somit gehemmt und infolgedessen drücken sie nun auf die Plasmahaut. Dieser Druck pflanzt sich unmittelbar auf die Cellulosehaut weiter, die dadurch gespannt wird. Die Zelle wird dadurch fest und hart, ähnlich wie ein Gummiball, in den Wasser eingepreßt wird. In der Zellwand ist also potentielle Energie vorhanden, die aus der Umwandlung der osmotischen Energie entstanden ist.

Wird nun in einer Zelle der osmotische Druck vermindert, so wird die potentielle Energie der Cellulosewand frei und die Folge davon besteht in einer Verkürzung der Wand, wodurch das Volumen der Zelle verkleinert wird. Tritt eine solche Volumenverminderung bloß in den Zellen der einen Flanke eines Organes ein, so ist die notwendige Folge die Krümmung des ganzen Organes nach dieser Seite hin. Umgekehrt kann eine Krümmung ebensogut zustande kommen, wenn der osmotische Druck der Zellen bloß einer Flanke erhöht wird. Dadurch werden die Volumina der Zellen dieser Flanke vergrößert und es kommt zu einer Krümmung gegen die andere Seite hin. Beispiele für diese Arten von Bewegungen sind im folgenden Abschnitt mitgeteilt.

So sehen wir denn, daß es Bewegungen gibt, bei denen die mechanische Energie direkt durch Umwandlung osmotischer Energie entsteht. Man könnte nun denken, daß die osmotische Energie entstünde durch Umwandlung von chemischer Energie, die bei der Atmung frei wird, insofern als diese chemische Energie bei der Synthese osmotisch wirksamer Substanzen beteiligt wäre. Darüber wissen wir aber nichts. Andererseits aber wissen wir, daß eine Mitwirkung der Atmung bei der Erzeugung osmotisch wirksamer Stoffe vielfach ausgeschlossen ist. Das ist z. B. der Fall, wenn aus der osmotisch unwirksamen Stärke durch enzymatischen Abbau ein osmotisch wirksamer Zucker entsteht.

Damit kommen wir auf die Energiequelle, von der letzten Endes alle pflanzliche Bewegung abhängt. Die Stärke wurde gebildet bei der Assimilation der Kohlensäure und die Energie, die für diesen Prozeß nötig war, lieferte die Sonne. Aber auch da, wo wir den direkten Zusammenhang noch nicht übersehen, können wir sagen, daß alle pflanzliche Bewegungsenergie in letzter Linie nichts anderes ist als transformierte Sonnenenergie, denn ohne Sonne ist ein pflanzliches und damit auch ein tierisches Leben auf die Dauer nicht möglich. Von einem klaren Ueberblick über die Umwandlungsformen, die die Sonnenenergie in der Pflanze durchläuft, ehe sie als mechanische Energie wieder zum Vorschein kommt, sind wir aber, wie aus dem Vorstehenden hervorgeht, noch weit entfernt. Immerhin haben wir soviel gesehen, daß wir unseren Vorstellungen über die energetischen Umsetzungen in der Pflanze nicht ohne weiteres die Verhältnisse in der Dampfmaschine zugrunde legen dürfen.

Wenn nun aber auch die Energie vorhanden ist, die zur Ausführung einer Bewegung nötig ist, so erfolgt die Bewegung doch nur dann, wenn noch eine weitere Bedingung erfüllt ist. Wir haben z. B. gesehen, daß der Sproß der Pflanzen beträchtlich mehr Energie zur Verfügung hat, als nötig ist um eine Krümmung auszuführen. Trotzdem krümmt sich der Sproß nur unter ganz bestimmten Bedingungen. Solange wir ihn aufrecht stehen lassen, geschieht nichts. Erst dann, wenn wir ihn aus der Senkrechten herausbringen und zur Richtung der Schwerkraft schief stellen, krümmt er sich. Die Schwerkraft spielt also, obgleich sie nicht die Energie liefert, bei der Aufwärtskrümmung doch eine Rolle. Sie gibt den äußeren Anstoß zur Bewegung, sie wirkt als Reiz, sie löst die Bewegung aus. Etwas ganz Analoges haben wir bei einer elektrischen Klingel. Die Glocke läutet erst, wenn wir mit dem Finger den Taster hinabdrücken, und den Stromkreis schließen. Das Klingeln aber wird durch die elektrische Energie besorgt, die im Apparat vorhanden ist.

Krümmungen werden durch sehr verschiedene äußere Faktoren ausgelöst. So ist es z. B. eine bekannte Erscheinung, daß die Stengel und Blätter von Pflanzen, die im Zimmer stehen, sich dem Fenster zuwenden. In diesem Falle wirkt die ver-

schieden starke Belichtung entgegengesetzter Seiten als die Krümmung auslösender Faktor. Wieder andere Bewegungen werden ausgelöst durch Aenderung der Temperatur. So öffnen sich z. B. die Krokus- oder Tulpenblüten, wenn sie aus einer tieferen Temperatur, in der sie geschlossen sind, in eine höhere versetzt werden.

Wenn die genannten Faktoren, Schwerkraft, Licht, Wärme auf die Pflanze wirken, und Krümmungen auslösen, so ist damit notwendigerweise eine Energieeinfuhr in den Organismus verbunden. Denn es kann z. B. nur das Licht als Reiz wirken, das wirklich in die Pflanze hineingelangt. Die mit dem Reiz eingeführte Energie kommt aber nicht als Bewegungsenergie in Frage, wie wir bereits oben auseinandergesetzt haben und was auch dadurch bestätigt wird, daß in manchen Fällen ein Energieentzug als Reiz wirken kann, während die dadurch ausgelöste Bewegung natürlich nur unter Energieaufwand vor sich gehen kann. Dieser Fall tritt z. B. dann ein, wenn Krokusblüten sich schließen sobald sie in eine tiefere Temperatur übergeführt werden.

Bei den meisten Bewegungen ist der Reiz, der sie auslöst, ein äußerer Faktor. Daneben kommen aber auch Bewegungen vor, die eintreten, ohne daß ein äußerer Anstoß vorhanden ist. In dem Fall haben wir aber gute Gründe, anzunehmen, daß irgendein innerer Faktor oder Vorgang als Reiz wirkt.

Wir können deshalb die vitalen Bewegungen nach dem Sitz der auslösenden Kraft, ob innerlich oder äußerlich in zwei Gruppen einteilen, die wir unterscheiden als a) anatonome, durch innere Faktoren ausgelöste, und b) aitionome, durch äußere Faktoren ausgelöste Bewegungen, die vielfach auch als induzierte oder paratonische Bewegungen bezeichnet werden.

2b) Formen und Mechanismen der vitalen Bewegungen. Die Bewegungen einzelliger Pflanzen unterscheiden sich von denen mehrzelliger nach Form und Mechanismus in so mancher Hinsicht, daß es zweckmäßig erscheint, die beiden Gruppen getrennt zu behandeln.

α) Bewegungen einzelliger Pflanzen und Bewegungen des Zellinhaltes. aa) Amöboide Bewegungen. Für einen nackten Protoplasten liegen andere Bewegungsmöglichkeiten vor, als für eine behäutete Zelle. Das Prinzip, wonach nackte Protoplasten sich durch beständige Veränderung ihrer Form vorwärts bewegen, wie das bei den tierischen Amöben der Fall ist, ist auch im Pflanzenreich zur Anwendung gekommen. Allerdings spielt diese Art der amöboiden Bewegung hier keine große Rolle. Sie tritt auf bei sehr niedrigen pflanzlichen Organismen, bei den Myxomyceten. Der Vegetationskörper dieser Pflanzen, der als Plasmodium bezeichnet wird, ist nichts anderes als eine nackte Protoplasmamasse, die zum Teil recht groß werden kann. Diese Plasmodien bilden nicht eine gleichmäßige Masse, sondern sie bestehen aus dickeren und dünneren Fäden, die reich verzweigt sind und vielfach sich miteinander netzförmig verbinden (siehe Fig. 1). Am Vorderende des Plasmodiums sind die dickeren Fäden, die Hauptstämme, besonders reich verzweigt und die Enden kolbig angeschwollen. Fortwährend werden neue Aeste ausgestülpt und schon bestehende wieder eingezogen. Dieses fortlaufende Spiel des Aus- und Einstülpens bewirkt die Be-



Fig. 1. Plasmodium von Fuligo varians auf Fließpapier kriechend. Nach Jost.

wegung der ganzen Plasmamasse auf dem Substrat.

Aber auch im Innern des Plasmodiums finden Bewegungen statt. Die Außenschicht der Stränge ist hyalin und völlig ruhend. Anders aber verhält sich das Innere der Stränge. Da ist das Plasma nicht mehr hyalin, sondern gekörnelt und in Strömung begriffen. Dabei geht diese Strömung einige Zeit in einer bestimmten Richtung und schlägt hierauf in die entgegengesetzte Richtung um.

Die amöboide Fortbewegung der Plasmodien ist recht langsam. Das Plasmodium von Didymium serpula legt in der Sekunde etwa 6 μ zurück, während Stemonitis fusca es bloß auf 2,5 μ bringt. Die Bewegungsenergie genügt zur Bewältigung des eigenen Gewichtes. Man kann nämlich Plasmodien auf Fließpapier hochwandern lassen, das auf vertikal stehenden Glasplatten ausgebreitet ist, deren unteres Ende in Wasser steht.

Ueber die Mechanik der amöboiden Bewegung wissen wir noch nicht viel Positives. Es sind zwar schon eine ganze Anzahl Theorien aufgestellt worden, doch hat noch keine eine befriedigende Lösung des Problems zu geben vermocht. Wir wollen deshalb hier auch nicht in die Einzelheiten dieser Erklärungsversuche eintreten, sondern bloß einige Punkte hervorheben, die für die Beurteilung der Erscheinung in Betracht kommen können. Wichtig ist, daß das Plasma in vielen Fällen eine zähflüssige Masse darstellt und deshalb offenbar den physikalischen Gesetzen der Flüssigkeiten unterworfen ist, daß es sich also verhält wie ein Flüssigkeitstropfen. In solchen Tropfen spielt nun die Oberflächenspannung eine große Rolle. Sie ist es, die einen freischwebenden Flüssigkeitstropfen zwingt, Kugelform anzunehmen, da sie danach strebt, die Oberfläche des Tropfens so weit zu verkleinern, als das bei dem gegebenen Volumen möglich ist. Wird die Oberflächenspannung lokal vermindert, so tritt dadurch eine Störung des Gleichgewichtes im Tropfen ein und die Folge davon ist, daß an der betreffenden Stelle eine Ausbuchtung des Tropfens erfolgt. Setzen wir an die Stelle des Flüssigkeitstropfens einen Protoplasmatropfen, so können wir uns sehr wohl vorstellen, daß auch hier die Ausstülpung von Aesten durch eine lokale Verminderung der Oberflächenspannung zustande kommt und daß wieder eine Einstülpung erfolgt, wenn in den Ausbuchtungen die Oberflächenspannung wieder erhöht wird. Adhäriert dabei die Spitze der Ausbuchtung stärker am Substrat als der übrige Tropfen, so muß zugleich die ganze Tropfenmasse nachgezogen werden. Dabei bliebe aber dann immer noch unerklärt, durch welche Kräfte im Plasma die lokale Herabsetzung und Wiedererhöhung der Oberflächenspannung hervorgerufen würde. Die gegebene Erklärung hat aber noch einen anderen Haken, nämlich den, daß wir das Plasmodium gar nicht ohne weiteres einem Flüssigkeitstropfen homolog setzen dürfen. Die periphere Plasmodiumschicht, die sogenannte Hautschicht, hat eine ansehnliche Kohäsion. Man hat nach Belastungsexperimenten, die mit Plasmodiumsträngen gemacht wurden, das Tragvermögen der Hautschicht auf 300 mg pro qmm berechnet. Wir haben es also in dieser Hautschicht, die bis 0,01 mm dick wird, nicht mit einer Flüssigkeit zu tun und die amöboide Formveränderung kann deshalb nicht durch Aenderung der Oberflächenspannung bewirkt werden. Wir müssen deshalb annehmen, daß der Protoplast andere Mittel, als die Herabsetzung der Oberflächenspannung anwendet, um in der konsistenteren Hautschicht eine Ausstülpung hervorzurufen. Man könnte dabei an lokale Quellungen der Hautschicht denken, oder es wäre auch mit der Möglichkeit zu rechnen, daß dünnflüssiges Plasma von innen hier sich in die Hautschicht eindrängt, um dort dann ebenfalls konsistenter zu werden.

Aus diesen kurzen Andeutungen über die Mechanik der amöboiden Bewegung des Plasmodien ist wohl zu ersehen, daß wir von einer wirklichen Einsicht in das Problem noch weit entfernt sind.

bb) Plasmabewegung in behäuteten Zellen. Auf amöboide Art können sich die Zellen nicht mehr vom Ort bewegen, wenn sie von einer Cellulosehaut umgeben sind, die ja starr und unveränderlich ist. Im Innern solcher Zellen aber herrscht keine Ruhe, sondern Bewegung. Das Protoplasma ist es, das sich bewegt, gleichgülitg, ob die behäutete Zelle ein selbständiges Einzelwesen vorstellt, oder ob sie als Glied einer mehrzelligen Pflanze ihre Selbständigkeit mehr oder weniger weitgehend aufgegeben hat. In manchen behäuteten Zellen, wie es z. B. sehr schön in den Zellen der Kürbishaare oder in den Zellen der Staubfadenhaare von Tradescantia virginica (Fig. 2) zu sehen ist, durchziehen vom wandständigen Protoplasma aus zahlreiche Plasmastränge den Zellraum. Sie sind bald dicker, bald dünner, verzweigen sich vielfach und verbinden sich ebenso oft netzartig miteinander. Dieses Netz nun ist, solange es lebt, in beständiger Veränderung begriffen. An einer Stelle werden Anastomosen gelöst, Stränge werden kleiner, um schließlich ganz zu verschwinden. An anderen Orten hingegen werden neue Stränge ausgestülpt, und neue Anastomosen entstehen. So ist also das ganze protoplasmatische Netzwerk in fortwährender Formveränderung begriffen. Damit ist die Sache aber noch nicht erschöpft.

In den Plasmasträngen selbst sind, wie beim Myxomycetenplasmodium Strömungen vorhanden. Die Richtung dieser Strömungen ist eine ganz verschiedene. In den einen Strängen ist die Bewegung des gekörnelten Strangplasmas gegen das Zentrum, in anderen gegen die Peripherie der Zelle gerichtet. In dickeren Strängen kommen manchmal nebeneinander mehrere verschieden gerichtete Strombahnen vor. Diese geschilderte Art der Plasmabewegung in behäuteten Zellen unterscheidet sich im Prinzip kaum von der Bewegung der Plasmodien und schließt sich direkt daran an. Man bezeichnet sie als Zirkulation.



Fig. 2. Zelle aus einem Staubfadenhaar von Tradescantia virginica. Nach Strasburger. Das Protoplasma ist fein punktiert. Der runde Körper in der unteren Zellhälfte ist der Zellkern. Vom wandständigen Protoplasma aus durchziehen dickere und dünnere Plasmastränge den Innenraum der Zelle.

In manchen Zellen findet sich eine große zentrale Vakuole, die von dem wandständigen Protoplasma umgeben wird. In vielen so gebauten Zellen bewegt sich das Plasma in gleichmäßigem Strom um die Vakuole herum. Besonders schön zeigt sich diese Erscheinung, die als Rotation bezeichnet wird, in Wurzelhaaren von Wasserpflanzen, in den langen Zellen der Charen, ebenso in den Blättern von Elodea und Vallisneria. Die Hautschicht bleibt, wie es scheint, bei dieser Art Bewegung in Ruhe und es strömen bloß die inneren Protoplasmaschichten.

Ueber die Mechanik der Plasmaströmungen wissen wir noch viel weniger als über die Mechanik der amöboiden Bewegung der Plasmodien. Es ist zu vermuten, daß Aenderungen der Oberflächenspannung an der Grenze von Plasma und Zellsaft eine wesentliche Rolle spielen, doch ist ein entscheidender Beweis dafür noch nicht vorgebracht.

An die Protoplasmaströmung wollen wir die Besprechung der Bewegungen der übrigen lebenden Inhaltsbestandteile der Zelle anschließen. Es kommen hier in Betracht Bewegungen der Vakuolen, des Zellkerns und der Chromatophoren.

cc) Kontraktile Vakuolen. Die Bewegung von Vakuolen besteht darin, daß sie rhythmisch ihr Volumen verkleinern und wieder vergrößern. Solche pulsierende Vakuolen sind bei höheren Pflanzen nicht nachgewiesen, finden sich aber im Plasmodium der Myxomyceten, in den Schwärmsporen niederer Pilze, wie Saprolegnia und Cystopus, bei den meisten Volvocineen und Flagellaten und in den Schwärmsporen von Stigeoclonium, Ulothrix u. a. Sehen wir vom Plasmodium ab, wo sie zahlreich sind, so sind die pulsierenden Vakuolen nur in geringer Zahl (1 bis 3) vorhanden. Das Zusammenziehen der Vakuole geschieht ganz plötzlich und damit verschwindet sie in manchen Fällen ganz, um dann aber an der gleichen Stelle wieder zum Vorschein zu kommen. Sie wächst dann wieder bis zu einer gewissen Größe, und klappt dann von neuem plötzlich zusammen. Manche Vakuolen sind nach dem Zusammenklappen nicht ganz verschwunden, sondern haben bloß ihr Volumen beträchtlich vermindert.

Ueber die Mechanik der Pulsation lassen sich einige Anhaltspunkte gewinnen. Es ist dabei in Betracht zu ziehen, daß die Vakuole ein osmotisches System vorstellt, dem von außen her der osmotische Druck der Stoffe entgegenwirkt, die im Plasma gelöst sind. Eine Erhöhung des osmotischen Druckes im Plasma muß notwendigerweise das Volumen der Vakuole vermindern. Dadurch ist aber keine zu große Volumverkleinerung erreichbar, da der osmotische Druck in der Vakuole mit der Volumverminderung zunehmen muß. Es ist deshalb eher daran zu denken, daß der osmotische Druck in der Vakuole herabgesetzt wird, was durch eine Aenderung der Permeabilität der Vakuolenhaut geschehen kann, wodurch eine Exosmose der Stoffe möglich wird, die in der Vakuole gelöst sind.

dd) Bewegungen des Zellkerns. Befindet sich das Plasma der Zellen in Bewegung, so werden auch Zellkern und Chromatophoren rein passiv mitbewegt. In den Zellen von Vallisneria werden beide in beständig kreisender Bewegung rings um die Vakuole herumgeführt, wie Schiffe in einem Strom.

Ob der pflanzliche Zellkern außerdem die Fähigkeit hat, sich im Plasma aktiv zu bewegen, ist noch sehr wenig geklärt. Immerhin muß zugegeben werden, daß in einzelnen Fällen eine gewisse Wahrscheinlichkeit dafür vorliegt.

ee) Bewegung der Chromatophoren. Besser als die Bewegungen des Zellkerns sind die Bewegungen der Chlorophyllkörner bekannt. Unter dem Einfluß des Lichtes führen sie in der Zelle sehr auffällige Be-

wegungen und Verlagerungen aus. Im Dunkeln ist ihre Lage in der Zelle eine andere als im Licht (Fig. 3). Die Schnelligkeit, mit der diese Wanderungen ausgeführt werden, ist gering. So legt ein Chlorophyllkorn von Funaria in der Sekunde bloß einen Weg von 0,008 μ zurück. Doch kommen im einzelnen wohl ziemliche Differenzen vor, denn in anderen Fällen ist die Geschwindigkeit ziemlich größer und beträgt bei Striatella etwa 0,1 μ pro Sekunde, was zwar absolut genommen immer noch recht langsam ist.

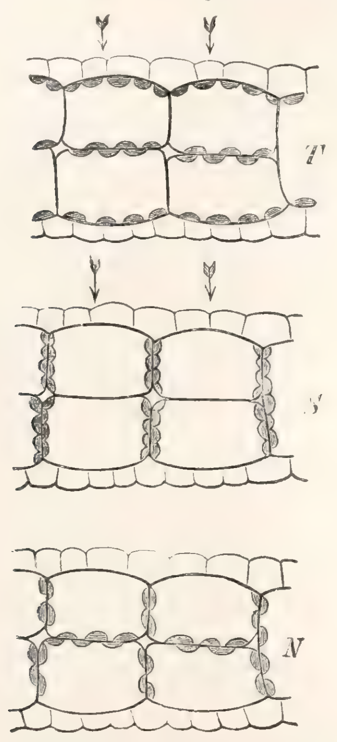


Fig. 3. Wechselnde Stellung der Chlorophyllkörner in den Zellen der untergetauchten Wasserlinse (Lemna trisulca) bei verschiedener Beleuchtung. T Im diffusen Tageslicht. S Im direkten Sonnenlicht. N Nachts. Die Pfeile zeigen die Richtung des einfallenden Lichtes an.

In bezug auf diese Bewegungen wurde, wie beim Zellkern, die Frage diskutiert, ob die Chromatophoren dabei aktiv tätig sind, oder ob das Plasma als Bewegungsorgan anzusprechen sei. A priori ist zuzugeben, daß beide Möglichkeiten vorkommen können. Hält man die Chromatophoren für passiv, so ist zu bemerken, daß für ihre Bewegungen, die unter dem Einfluß des Lichtes erfolgen, nicht die oben geschilderte Zirkulation oder Rotation des Plasmas in Frage kommen kann, denn die Richtung der Wanderung, die die Chromatophoren auf den Lichtreiz hin ausführen, fällt nicht notwendig mit der Richtung der Zirkulations- und Rotationsströmung zusammen, was sich z. B. an der Diatomee Striatella beobachten läßt. Man müßte deshalb eher an allmähliche, von Zirkulation und Rotation unabhängige Bewegungen im Protoplasma denken. In neuerer Zeit wurde aber zu zeigen versucht, daß die Chromatophoren sich aktiv bewegen. Um das Chlorophylkorn herum befindet sich eine schmale farblose, protoplasmatische Hülle (als Peristromium bezeichnet). Dieses Peristromium soll seinen Umriß in amöboider Weise ändern können, also beliebig Ausstülpungen entsenden, und wieder einziehen können. Nach dieser Ansicht würden die Chlorophylkörner im Plasma auf der Hautschicht dahinkriechen, gleich wie das Plasmodium der Myxomyceten auf dem Substrat kriecht. Zur Stütze dieser Auffassung kann angeführt werden, daß man in gewissen Zellen, wie bei Funaria, etwas dichtere plasmatische Stränge beobachtet hat, die zwischen den einzelnen Chlorophyllkörnern ausgespannt sind und da, wo sie an die Körner ansetzen, sich etwas verbreitern.

Während der Bewegung der Chromatophoren verkürzen oder verlängern sich diese Stränge und können sich wohl auch lösen, so daß dadurch die Verbindung zwischen zwei Körnern unterbrochen wird. Diese Stränge können nun natürlich ebensogut Ausstülpungen der Peristominus sein, als auch lediglich dem Plama angehören. Ob die eine oder andere dieser Ansichten richtig ist, dafür ist bis jetzt noch kein wirklich entscheidender Beweis erbracht worden, wenn auch zuzugeben ist, daß die Annahme der Aktivität der Chloroplasten vieles für sich hat.

Damit haben wir die Besprechung der Bewegungen der Zellinhaltsbestandteile zu Ende geführt und wollen nun wieder zur freien Ortsbewegung der einzelligen Pflanzen zurückkehren.

Als solche Bewegung haben wir bis jetzt die amöboide Bewegung der Plasmodien kennen gelernt. Es wird dabei, wie wir gesehen haben, die Gestalt des Plasmodiums beständig geändert. Die meisten einzelligen Pflanzen bewegen sich aber auf andere Art und zwar so, daß sie ihre Form während der Bewegung nicht ändern. Das ist natürlich selbstverständlich, sobald die Zelle von einer starren Cellulosehaut umgeben ist, doch gibt es auch freie Einzelzellen ohne Cellulosehaut, die sich trotzdem nicht amöboid bewegen. Unter die Rubrik dieser nicht amöboiden Bewegungen fallen Bewegungen, die auf sehr verschiedene Art zustande kommen.

ff) Bewegung der Desmidiaceen. Relativ einfach verhalten sich die Desmidiaceen. Sie schieben sich auf der Unterlage dadurch fort, daß sie an einem Zellende durch

besondere Poren der Zellulosewand Schleim absondern. (Fig. 4.)

gg) Bewegung der Diatomeen. Wieder anders verhalten sich die Diatomeen, die sich ebenfalls langsam bewegen, so daß der Weg, den sie in der Sekunde zurücklegen gewöhnlich kleiner als 0,02 mm ist. Gewichtige Gründe sprechen dafür, daß diese Bewegungen durch extrazelluläres Plasma bewirkt werden. Aus den Polspalten der beiden Schalenseiten des einen Endes der Diatomee tritt Plasma aus und strömt in der Spalte des Raphe nach hinten zum Mittelknoten, wo es durch die dort vorhandenen Poren wieder ins Zellinnere gelangt. Infolge der Reibung dieser Ströme am umgebenden Wasser, oder am Substrat, wenn ihm die eine Schalenseite gerade aufliegt, wird die Diatomee vorwärtsbewegt. Die Existenz

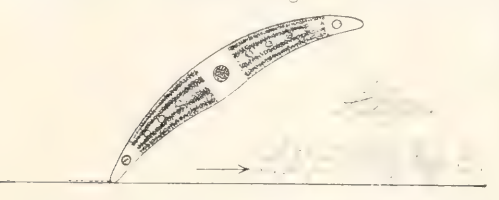


Fig. 4. Closterium (Desmidiacee) bewegt sich durch Ausscheidung von Schleim an einem Zellende auf der Unterlage vorwärts. Das nicht secernierende Ende ragt frei in das Wasser hinaus. Nach M. Verworn.

der Ströme wird deutlich, wenn die Diatomeen in fein verriebene Tusche gebracht werden (Fig. 5). Die Tuschepartikelchen, die dem extrazellulären Plasma anliegen, werden dann durch seine Strömung in Bewegung gesetzt.

hh) Schwimmbewegung vermittels Geißeln und Cilien. Weit verbreiteter als der Bewegungsmodus von Desmidiaceen und Diatomeen ist die Schwimmbewegung mit Hilfe von Cilien. Mit solchen Bewegungsorganen sind versehen viele Flagellaten, Bakterien und Algen (wie z. B. die Volvocineen (Fig. 6), ferner die Schwärmsporen der Algen und Pilze (Fig. 7) und die Spermatozoiden. Die Zahl der Cilien oder Geißeln ist sehr verschieden. Manche Bakterien sind mit zahlreichen Cilien ausgestattet, während die Schwärmsporen in weitaus den meisten Fällen nur zwei besitzen, die nebeneinander inseriert sind. Beim Schwimmen geht das bewimperte Ende meist voraus, doch kommt auch das Gegenteil vor.

In der Regel findet während des Schwimmens eine Drehung des Organismus um seine eigene Achse statt. Daß die Cilien wirklich die Bewegungsorgane sind, läßt sich nachweisen dadurch, daß die Bewegung aufhört, wenn man die Cilien entfernt, was bei Schwärmsporen durch kräftiges Schütteln gelingt.

Die Mechanik der Cilien ist noch nicht genügend geklärt. Im allgemeinen wird man annehmen können, daß sie sich sehr rasch nach rückwärts und dann wieder langsam nach vorwärts bewegen, so daß der Organismus wie durch Ruderschläge vorwärts bewegt wird.

Die absolute Geschwindigkeit der Schwimmbewegung, die natürlich nach den Außenbedingungen variiert, ist nicht groß. Die

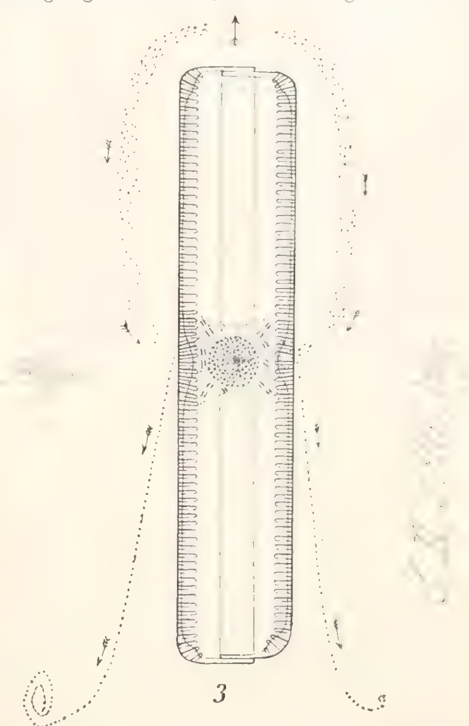


Fig. 5. Diatomee Pinnularia viridis. Die schwarzen Punkte bedeuten Tuschekörnchen, die durch das extrazelluläre Plasma in Bewegung versetzt werden. Die Pfeile geben die Bewegungsrichtung an. Nach Lauterborn.

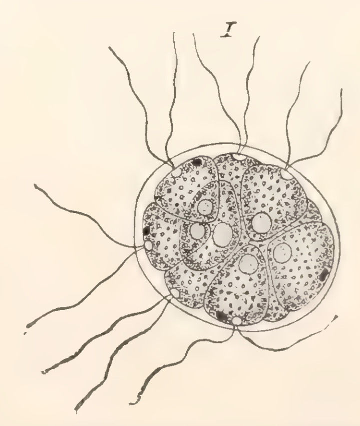


Fig. 6. Pandorina Morum, eine bewegliche Alge aus der Familie der Volvocaceae. Jede Zelle mit 2 Geißeln. Nach Pringsheim.

Schwärmsporen von Ulva legen in der Sekunde 0,15 mm zurück und gehören damit zu den schneller beweglichen, während Farnspermatozoiden es in der Sekunde bloß auf 0,015 bis 0,030 mm bringen.

Die vorgeführten Ortsbewegungen der Einzelligen können autonom sein: autonome



Fig. 7. Saprolegnia mixta, ein Pilz aus der Ordnung der Oomycetes. Die begeißelten Schwärmsporen verlassen eben das Sporangium. Nach Klebs.

lokomotorische Bewegungen, oder sie werden durch äußere Reize ausgelöst: lokomotorische Richtungsbewegungen. Je nach der Art des Reizes unterscheidet man in dem Fall Phototaxis, Thermotaxis, Chemotaxis usw.

β) Bewegungen mehrzelliger Pflanzen. In der Regel sind die mehrzelligen Pflanzen festsitzend und können sich nicht frei vom Ort bewegen. Diesem Mangel suchen sie durch verschiedenartige Bewegungen ihrer Organe abzuhelfen, denn nicht bloß die einzellige freie, sondern auch die mehrzellige festgewurzelte Pflanze hat das Bestreben sich dahin zu begeben, wo ihr die äußeren Bedingungen, z. B. Wärme und Licht am besten zusagen. Während aber der freibewegliche Organismus diesem Bestreben durch jederzeitige Aenderung seines Standortes genügen kann, ist der bewurzelte Organismus an seinen Standort gebunden und muß sich damit behelfen seine Organe, wie Sprosse und Blätter, durch Krümmungen und Drehungen in eine möglichst günstige Lage zu bringen oder seinen Fortpflanzungsprodukten durch Abschleuderung günstigere Keim- und Wachstumsbedingungen zu schaffen.

Im folgenden wollen wir zuerst die Krümmungen und Torsionen, und hierauf die Schleuderbewegungen besprechen.

aa) Krümmungen und Torsionen. Eine Krümmung eines pflanzlichen Organes, z. B. eines Stengels, kann nur erfolgen, wenn zwei einander gegenüberliegende Flanken sich verschieden verhalten. Es muß entweder die eine Flanke sich verkürzen, oder es muß die andere sich verlängern. Wenn beides gleichzeitig geschieht, so ändert das am Endresultat nichts.

Wie kann nun aber die Pflanze die Länge opponierter Flanken ändern, entweder verkleinern oder vergrößern? Es stehen ihr zu dem Zwecke zwei Mittel zu Gebote. Eine Veränderung der Flankenlängen kann dadurch bewirkt werden, daß das Längenwachstum entgegengesetzter Flanken verschieden stark ist. Krümmungen, die auf diesem Wege zustande kommen, nennt man Nutationskrümmungen.

Das zweite Mittel, dessen sich die Pflanze zur Erzielung von Krümmungen bedient, besteht in der Aenderung des Turgors opponierter Flanken. Nimmt z. B. der Turgor nur auf der einen Seite ab, so tritt notwendigerweise eine Krümmung nach dieser Seite hin ein. Ebenso muß natürlich eine Krüm-

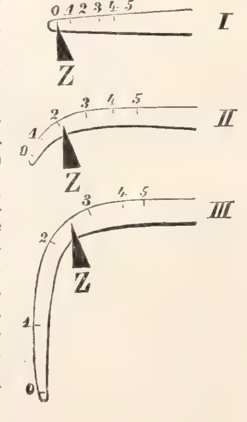


Fig. 8. Geotropische Abwärtskrümmung einer Keimwurzel von Vicia Faba. Nach Sachs.
I. Die Wurzel horizontal gelegt und in gleichen Abständen mit Tuschestrichen (0, 1, 2, 3, 4, 5) markiert.
II. Gleiche Wurzel nach 7 Std. Die Tuschemarken infolge des Wachstums auseinandergerückt. Die Krümmung ist in der wachsenden, hinter der Spitze gelegenen Zone eingetreten.
III. Nach 23 Stunden. Krümmung vollendet.

mung eintreten, wenn der Turgor auf bloß einer Seite zunimmt, oder wenn er auf der einen Flanke zu-, auf der anderen aber abnimmt. Solche Krümmungen, die durch Turgoränderung zustande kommen, heißen Variationskrümmungen.

Wir wollen nun etwas näher auf die beiden, soeben hier skizzierten Arten von Krümmungen eingehen.

$\alpha\alpha$) Nutationskrümmungen. Sie sind naturgemäß beschränkt auf wachsende Teile der Pflanze, oder auf solche Teile, die trotzdem sie nicht mehr wachsen, doch wieder zum Wachsen angereizt werden können. Die Krümmungen, die von Wurzeln (Fig. 8) und Sprossen ausgeführt werden, sind Nutationskrümmungen. Sie treten bloß in der wachsenden Region dieser Organe ein. In den Gramineenstengeln ist das Wachstum auf

die Knoten beschränkt, die deshalb allein die Krümmungen ausführen (Fig. 9), während die Internodien gerade bleiben. Hierher gehören ebenfalls die Oeffnungs- und Schließbewegungen von Blüten, wie Tulpe und Krokus und der Kompositenköpfchen (Fig. 10).

Für die Mechanik der Nutationskrümmungen kommt in Frage, ob das Wachstum der konvex werdenden Flanke gegenüber dem normalen Wachstum des nicht gekrümmten Organes beschleunigt ist, oder ob das Wachstum auf der Konkavseite verlangsamt wurde. Als weitere Möglichkeit kommt hinzu, daß das Wachstum auf beiden Seiten be-

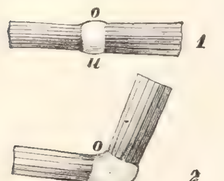


Fig. 9. Geotropische Krümmung eines Knotens eines Grashalmes. Aus dem „Lehrbuch der Botanik für Hochschulen". 1. Der Halm horizontal gelegt. 2. Der Knoten gekrümmt. Seine Unterseite (u) stark verlängert, seine Oberseite (o) unverlängert oder etwas verkürzt.

schleunigt sein könnte, in dem Fall aber ungleich stark oder es könnte auf der einen Seite beschleunigt, auf der anderen aber verlangsamt sein.

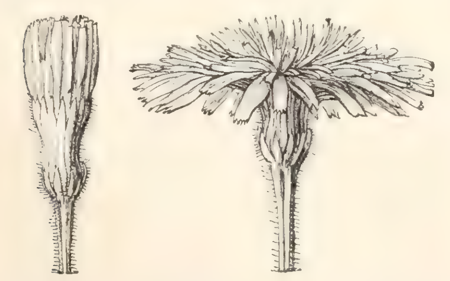


Fig. 10. Blütenköpfchen einer Komposite (Leontodon hastilis). Links infolge Verdunklung geschlossenen, rechts nach Belichtung wiedergeöffnet. Nach Detmer.

Vielfach ist die letztgenannte Möglichkeit verwirklicht. Bei Wurzeln, die sich geotropisch abwärts krümmten, fand z. B. Sachs in einem bestimmten Fall für die konvexe Seite eine Wachstumsbeschleunigung von 0,7 mm, während das Wachstum der konkaven Seite um 1,8 mm verlangsamt wurde. Ob das Wachstum in der Mittellinie der Wurzel zu- oder abgenommen hat, ist noch nicht definitiv entschieden, doch darf man wohl behaupten, nach den bis jetzt vorliegenden Messungen, daß eine nennenswerte Aenderung der Wachstumsgeschwindigkeit der Mittellinie kaum eintritt.

Sprosse, die sich geotropisch aufwärts krümmen, verhalten sich ähnlich. Auf der Konvexseite wird das Wachstum beschleunigt, auf der Konkavseite verlangsamt. Ueber das Verhalten der Mittellinie ist man hier besser orientiert, als bei den Wurzeln. Es hat sich herausgestellt, daß ihr Wachstum mehr oder weniger stark vermindert ist. Allerdings scheint es auch Fälle zu geben, in denen das Gegenteil der Fall ist (Hippuris), und die darauf hinweisen, daß eine Verallgemeinerung der an einem Objekt gewonnenen Resultate nicht ohne weiteres zulässig ist. Es mögen noch einige Zahlenangaben folgen:

Epilobium hirsutum, Zuwachs in mm.

	Gekrümmter Sproß	Aufrechter Kontrollsproß
Konkavseite	3,4	5,9
Konvexseite	13,7	5,9

Ailanthus glandulosa, Zuwachs in mm.

	Gekrümmter Sproß.	Aufrechter Kontrollsproß
Konkavseite	5,3	9,6
Konvexseite	19,5	12,0

Während in den angeführten Beispielen beide Flanken, sowohl die konvexe wie die konkave, absolut länger wurden, kommt auch der Fall vor, daß nur die konvexe Flanke an absoluter Größe zu-, die konkave aber abnimmt. Das ist der Fall bei den Krümmungen der Ranken (Haptotropismus). Hier wurde festgestellt, daß auf der Konvexseite das Wachstum beträchtlich gesteigert wurde, so daß die stündliche Verlängerung bis über 100 % betragen kann, während auf der Konkavseite in der Stunde eine absolute Verkürzung von etwa 1 % eintritt. Dabei ist das Wachstum der Mittellinie beträchtlich gesteigert. Ob die Verkürzung der Konkavseite aktiv eintritt oder als bloße Kompression infolge der Krümmung, ließ sich noch nicht entscheiden. Wir kennen aber einen anderen Fall, in dem die absolute Verkürzung der konkaven Flanke dadurch zustande kommt, daß diese Flanke mit Gewalt komprimiert wird. Diese Erscheinung findet sich bei den Knoten der Gräser, wo die Kompression der Konkavseite sich schon äußerlich durch ihre Faltung anzeigt. Einige Zahlen mögen das Gesagte belegen.

Cinquantino-Mais.

	Länge der Knoten in mm			
	Oberseite	Unterseite	Oberseite	Unterseite
vor d. Krümmung	4,3	4,1	4,0	5,0
nach d. Krümmung	2,5	9,0	3,0	11,0
Veränderung	— 1,8	+ 4,9	— 1,0	— 6,0

In allen Fällen handelt es sich um ein ungleich starkes Wachstum der Zellwände in den entgegengestzten Flanken. Dem Wachstum der Membranen geht eine Turgordehnung voraus. Legt man nämlich Sprosse, in denen die Krümmung noch nicht weit über das Anfangsstadium hinaus ist, in plasmolysierende Lösungen, so geht die Krümmung wieder zurück, erst weiter fortgeschrittene Krümmungen werden durch Plasmolyse nicht

mehr ausgeglichen. Man hat geglaubt, die anfängliche Turgordehnung käme dadurch zustande, daß der osmotische Druck auf der Konvexseite zunähme. Doch ist das kaum richtig, denn es hat sich herausgestellt, daß der osmotische Druck in manchen Fällen auf der Konkavseite gleichblieb und auf der Konvexseite abnahm. Es bleibt deshalb nichts anderes übrig, als anzunehmen, daß die ungleiche Turgordehnung der opponierten Flanken zusammenhängt mit einer Veränderung der Dehnbarkeit der Membranen, so daß die Membranen der Konvexseite dehnbarer werden. Dann muß notwendigerweise, ohne daß der Turgor erhöht wurde, eine Volumvergrößerung der Zellen eintreten. Das aber bewirkt dann in diesen Zellen wieder eine Abnahme des osmotischen Druckes, sofern nicht osmotisch wirksame Substanz neu produziert wird. Ueber die Ursachen der Veränderung der Dehnbarkeit der Membranen sind wir gänzlich im Unklaren, da wir ja auch über die Wachstumsmechanik der Zellhaut nichts Sicheres wissen.

Wenn das stärkere Wachstum nicht auf einer Flanke verbleibt, sondern sukzessive auf neue Flanken übergeht und so um das ganze Organ herumwandert, so ist die Folge davon nicht eine einfache Krümmung, sondern eine kreisende Bewegung, auch Zirkumnutation oder revolutive Nutation genannt. Bewegungen dieser Art finden wir bei den Ranken, wenn sie sich noch im Jugendstadium befinden und noch keine Stütze gefaßt haben und bei den Schlingpflanzen.

ββ) Variationsbewegungen. Bei manchen Pflanzen finden sich an der Basis der Blattstiele, wo sie dem Sproß aufsitzen, rundliche bis längliche Anschwellungen. Auch zwischen Blattlamina und Stiel, ebenso an der Basis der Einzelblättchen gefiederter Blätter sieht man diese Anschwellungen oft, so z. B. bei zahllosen Leguminosen. Sie haben eine besondere Bedeutung, sie sind Bewegungsorgane und heißen deshalb Gelenkpolster (siehe Fig. 11). Diese Gelenkpolster können Krümmungen ausführen und dadurch die Blätter oder Teilblättchen hin- und herbewegen. Das kann man z. B. an der Sinnpflanze (Mimosa pudica) sehr schön sehen. An der Basis des Blattstieles findet sich hier ein Gelenkpolster. Am Blattstiel selbst sind ebenfalls mit Hilfe von Gelenkpolstern, 2 Paare sekundärer Blattsiele angesetzt, die ihrerseits die Fiederblättchen tragen, deren jedes am Grunde mit einem Gelenkpolster versehen ist.

Nachts tritt im Gelenkpolster an der Basis eine Krümmung nach abwärts ein, so daß das ganz Blatt um 80 bis 100° gesenkt wird. Die Gelenke am Grunde der Sekundärblattstiele krümmen sich nach vorwärts, so daß die Sekundärblattstiele parallel miteinander in der Verlängerung des Hauptblattstieles zu liegen kommen. Die Gelenke der Blättchen krümmen sich aufwärts, so daß die einander gegenüberstehenden Fiederblättchen sich mit ihren Oberseiten aufeinanderlegen. Die Pflanze befindet sich nun in der sogenannten Schlafstellung (Fig. 12).

In Figur 13 ist die Krümmung der Gelenkpolster bei der Gartenbohne dargestellt, wo sich die Gelenke der Fiederblättchen nachts nach abwärts krümmen.

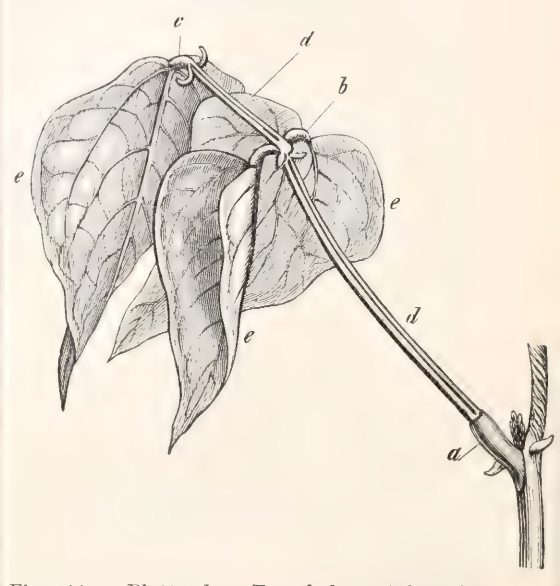


Fig. 11. Blatt der Feuerbohne (Phaseolus multiflorus) in Nachtstellung. a Gelenkpolster des Blattstieles dd. b c die Gelenkpolster der 3 Fiederblättchen. Nach Sachs.

Die Gelenkpolster, die solche Bewegungen ausführen, haben einen charakteristischen anatomischen Bau (siehe Fig. 14 und 15). Die Mitte wird durchzogen von einem Gefäßbündelstrang, der rings umgeben ist von einem parenchymatischen Gewebe mit stark dehnbaren Zellwänden, das nach außen durch die Epidermis abgegrenzt wird. Von diesen 3 Teilen des Gelenkes ist bloß das parenchymatische Gewebe an der Krümmung aktiv beteiligt. Diese Beteiligung besteht darin, daß durch Aenderung des Turgors eine Aenderung in der Länge der antagonistischen Flanken erzielt wird, was natürlich zu einer Krümmung führen muß. Wenn sich der Hauptblattstiel einer Mimose am Abend senkt, so können a priori verschiedene Möglichkeiten vorliegen. Entweder tritt in der oberen Hälfte des Gelenkpolsters eine Zunahme des Turgors ein, oder es wird umgekehrt in der unteren Hälfte der Turgor herabgesetzt. Daneben wäre noch eine dritte Möglichkeit zu erwähnen, nämlich die, daß der Turgor

in beiden Hälften zunimmt, aber ungleich rasch.

Um zu entscheiden, welche von diesen Möglichkeiten wirklich zutrifft, hat man schon früher versucht, den osmotischen Druck in den antagonistischen Gelenkhälften auf plasmolytischem Wege festzustellen, ohne einen Unterschied finden zu können. Man hat deshalb zu anderen Mitteln gegriffen und die Gelenke beobachtet, nachdem die eine Hälfte, einmal die obere, das andere Mal die untere, weggeschnitten war. Wurden so operierte Gelenke verdunkelt, so war das Ergebnis sehr merkwürdig. Beide Gelenkhälften, sowohl die obere wie die untere reagierten gleich, in beiden trat Expansion ein und infolgedessen bewegten sich Blätter, denen bloß die obere Gelenkhälfte belassen war, abwärts, andere hingegen, die nur noch die untere Gelenkhälfte besaßen, erhoben sich. Auf Grund dieser Experimente stellt man sich vor, daß nach Verdunkelung eine Erhöhung des Turgors in beiden Gelenkhälften eintritt, aber in der oberen schneller als in der unteren.



Fig. 12. Mimosa pudica. Links Tag-, rechts Nachtstellung. B Blütenköpfchen. Aus dem „Lehrbuch der Botanik für Hochschulen."

A

B

Fig. 13. Blattstiel der Gartenbohne, Fiederblättchen über dem Gelenkpolster abgeschnitten. A Tagesstellung, die Gelenkpolster nach aufwärts gekrümmt. B Nachtstellung, die Gelenkpolster abwärts gekrümmt. Nach Sachs.

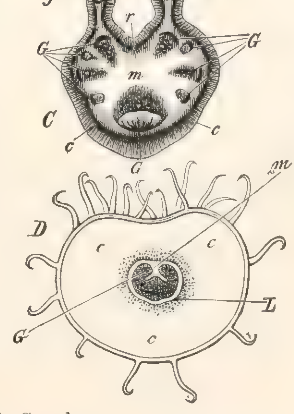


Fig. 14. C Querschnitt durch den Blattstiel der Gartenbohne. Die Gefäßbündel, G, G, im Kreise angeordnet, umgeben ein weißes Mark. D Querschnitt durch das Gelenkpolster. Die Gefäßbündel in einem einzigen zentralen Strang (G) vereinigt, der von dem die Bewegung vermittelnden parenchymatischen Gewebe c c umgeben wird. Nach Sachs.

Es frägt sich nun, wodurch die Erhöhung des Turgors zustande kommt. Entscheidend ist die Frage nicht gelöst. Man wird in erster Linie daran denken, daß osmotisch wirksame Substanz neu produziert wird. Wir haben bis jetzt bloß von der Senkung des primären Blattstieles der Mimose gesprochen, die nach Verdunkelung eintritt. Damit ist aber die Bewegung des Gelenkes nicht erschöpft, es erfolgt vielmehr im Dunkeln eine rückläufige Bewegung. Offenbar handelt es sich dabei darum, daß der Turgor in der unteren Gelenkhälfte zu, in der oberen aber abnimmt.

Eine Bewegung der Gelenkpolster tritt nicht allein nach Beleuchtungswechsel ein, sondern kann auch durch andere äußere Anstöße hervorgerufen werden.

Wird z. B. eine Bohnenpflanze, die in einem Topf gezogen ist, umgekehrt aufgestellt, so daß ihre Spitze nach unten, ihre Wurzel nach oben sieht, so krümmen sich ihre Gelenke nach aufwärts, so daß ihre morphologische Oberseite konvex, ihre morphologische Unterseite konkav wird. Diese Krümmungen gehen wieder zurück, wenn wir die Pflanze wieder normal stellen. Verursacht werden diese Bewegungen durch Turgoränderungen in den entgegengesetzten Flanken der Polster und man konnte in diesem Fall die Turgoränderungen plasmolytisch feststellen. In der konvex werdenden Flanke wird der osmotische Druck erhöht, in der konkav werden Flanke hingegen erniedrigt. Diese Aenderung des Turgors geht Hand in Hand mit einer Aenderung der Permeabilität der Plasmahaut. In der konvex werdenden Flanke nimmt die Permeabilität ab, in der konkav werdenden zu. Ein Beispiel möge das erläutern.

Phaseolus multiflorus.

Lage der Pflanze	Gelenkhälfte	Osmot. Druck in % Rohrzucker	Permeabilitätsfaktor
normal	obere	12,8	0,340
	untere	15,7	0,178
umgekehrt	obere	15,8	0,240
	untere	12,6	0,272

Es gehen somit miteinander parallel Turgorerhöhung und Permeabilitätsabnahme und Turgorabnahme und Permeabilitätszunahme, und man könnte deshalb geneigt sein, die Permeabilitätsänderung ohne weiteres als die Ursache der Turgoränderung zu betrachten. Wenn wir bloß die Turgor-

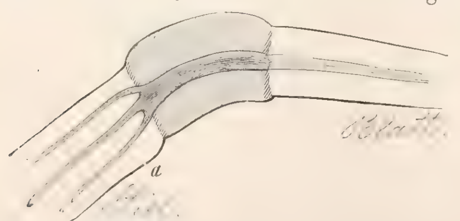


Fig. 15. Längsschnitt durch ein Gelenk von Phaseolus vulgaris. Das Gelenkpolster ist schraffiert, der Gefäßbündelstrang dunkler gehalten. Vergleiche dazu Figur 14. Nach Pfeffer.

abnahme im Auge behalten, so dürfte das richtig sein. Denn sobald die Permeabilität erhöht wird, so können gewisse Stoffe weit stärker exosmieren als bisher oder es können eventuell auch Stoffe austreten, die das bis jetzt nicht konnten. Durch diese Exosmose muß aber der osmotische Druck im Zellinnern vermindert werden. Nicht ganz so einfach liegen die Dinge im umgekehrten Fall, nämlich dann, wenn die Permeabilität vermindert wird. Dann können allerdings gewisse Stoffe nicht mehr, oder nicht mehr so stark exosmieren, wie bisher und werden deshalb einen erhöhten osmotischen Druck ausüben, denn der osmotische Druck eines Körpers ist um so größer, in je geringerem Maße er durch die Plasmahaut diosmieren kann. Soweit wäre die Sache in Ordnung. Nun ist aber zu bedenken, daß die Stoffe, für die der Durchtritt durch die Plasmahaut nun gesperrt ist, sich nicht nur innerhalb, sondern auch außerhalb der Zellen im Imbititionswasser der Zellwände befinden, da sie ja vorher, bei erhöhter Permeabilität hinausdiffundieren konnten. Es steht deshalb dem osmotischen Druck dieser Stoffe im Zellinnern, der osmotische Druck derselben Stoffe im Imbitionswasser gegenüber, so daß also dadurch ein Teil des Innendruckes annulliert wird. Deshalb kann unmöglich durch eine Verminderung der Permeabilität des Turgor der Zellen erhöht werden. Dazu sind noch andere Prozesse nötig. Man könnte daran denken, daß die exosmierten Stoffe von den Zellen wieder aufgenommen werden oder daß in den Zellen eine Neuproduktion osmotisch wirksamer Substanz eintritt.

Wir haben nun noch eine weitere Bewegung zu besprechen, die bei manchen Gelenken auftritt. Berührt man eine Mimosa, oder erschüttert man die ganze Pflanze leicht, so geht sie in eine Stellung über, die der Schlafstellung ganz ähnlich sieht. Auch leichte Berührung des Polsters, aber bloß der unteren Seite führt zum Ziel.

Die Abwärtskrümmung des Gelenkpolsters des primären Blattstieles kommt in dem Fall dadurch zustande, daß der Turgor in der unteren Gelenkhälfte wesentlich abnimmt, während sich die obere Hälfte nicht wesentlich expandiert. Während der Kontratation der Unterseite findet ein Austritt von Flüssigkeit in die Interzellularen der unteren Polsterhälfte statt. Diese Flüssigkeit wird von den Zellen wieder aufgenommen, wenn das Blatt sich wieder in seine normale Lage zurückbewegt, was nach einiger Zeit der Fall ist.

Wie die Turgorabnahme in der Unterseite zustande kommt ist bis jetzt noch nicht definitiv entschieden. Der Austritt von Flüssigkeit läßt sich sowohl mit einer Verminderung der osmotisch wirksamen Substanz, z. B. durch Kondensation, als auch mit einer Zunahme der Permeabilität der Plasmahaut in Einklang bringen.

$\gamma\gamma$) Torsionen sind verbreitet bei Blättern. So werden manche Blätter, wenn der Sproß so gedreht wird, daß ihre Unterseite

nach oben sieht, durch Torsion der Blattseite um 180° wieder in die normale Lage gebracht. Aehnlich verhalten sich manche Blüten, und auch Gelenke können Torsionen ausführen. In allen Fällen ist aber der Mechanismus der Torsionen noch gänzlich unaufgeklärt.

bb) Schleuderbewegungen. Ursache der vitalen Schleuderbewegungen ist der Turgor. Wir können zwei Hauptfälle unterscheiden. Im einen kommt das folgende Prinzip zur Geltung. Die Zellwand wird durch den zunehmenden osmotischen Druck immer stärker gespannt, bis sie schließlich an einer bestimmten, vorgebildeten Stelle reißt. Infolge der dadurch eintretenden Entspannung verkürzt sich die stark gedehnte Zellhaut plötzlich und übt dadurch einen starken Druck auf den Inhalt aus, der ausgespritzt wird.



Fig. 16. Ascobolus furfuraceus. I. Junger Ascus. II. Reifer Ascus. III. Entleerter Ascus. Nach de Bary.

Dieses Prinzip findet sich realisiert bei gewissen Ascomyceten, wo an der Spitze der Asci eine umschriebene Wandpartie abgesprengt und die Sporen ausgeschleudert werden (Fig. 16).

Bei Pilobolus (Fig. 17) liegen die Verhältnisse etwas komplizierter. Das Sporangium sitzt auf einer oben keulenförmig erweiterten Tragzelle in der der osmotische Druck beträchtlich steigt, bis die Wand schließlich rings unterhalb des Sporangiums reißt. Dadurch wird der Zellinhalt und damit zugleich das auf dem Loch sitzende Sporangium weggespritzt.

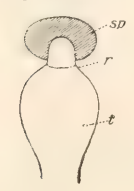


Fig. 17. Pilobolus. Schematischer Längsschnitt. t Oberes Ende der Tragzelle, r Rißstelle, Sp. Sporangium. Nach de Bary.

Die zweite Art von Schleuderbewegungen findet sich bei Früchten. In der Wand mancher Früchte befindet sich ein besonderes Schleudergewebe mit sehr dehnbaren Membranen und hohem Turgor. Da das Schwellgewebe aber im übrigen Gewebeverband steht, so kann sein Ausdehnungsbestreben, das durch den hohen Turgor verursacht wird, nicht befriedigt werden. Sobald aber irgendwie der Gewebeverband gelöst wird, kann sich das Schwellgewebe frei ausdehnen, wodurch Krümmungen und Rollungen von Fruchtwandpartien hervorgerufen werden.

Diesen Mechanismus finden wir z. B. angewendet in den Früchten von Impatiens. Der Fruchtboden hat fünf Fächer, worin die Samen in den zentralen Ecken sitzen. Zur Reifezeit lösen sich die fünf Scheidewände sowohl von der äußeren Wand, wie von den zentralen Ecken, die miteinander verbunden als zentrale Placenta bestehen bleiben. Zugleich trennt sich die Fruchtwand in fünf Klappen, die miteinander noch im Zusammenhang sind, und von denen jede vor einem Fruchtfall steht. Berührt man die reife Frucht leise, so erfolgt eine Isolierung der fünf Klappen und jede rollt sich rasch von unten nach innen auf, wodurch die Samen weggeschleudert werden. Diese Bewegung wird hervorgerufen, durch eine Schwellschicht, die unter der Epidermis liegt und in der intakten Frucht stark positiv gespannt ist.

3. Physikalische Bewegungen. Wie wir schon erwähnt haben, sind diese Bewegungen nicht an die Lebenstätigkeit der Pflanzen gebunden und treten deshalb sowohl an toten, wie an lebenden Pflanzen auf. Der Mechanismus der hierher gehörigen Bewegungen ist verschieden. Im einen Fall handelt es sich darum, daß die Zellwände entgegengesetzter Flanken verschieden stark quellbar sind. Das Prinzip des zweiten Mechanismus besteht darin, daß aus toten, wassergefüllten Zellen das Wasser allmählich verdunstet. Dadurch entsteht aber vorläufig noch kein wasserleerer, luftgefüllter Raum in den Zellen, das läßt die Kohäsion des Wassers und seine Adhäsion an der Membran nicht zu. Die notwendige Folge aber ist, daß bestimmte Membranpartien, die stärker dehnbar sind, in das Zellinnere hineingezogen werden. Befinden sich die dehnbareren Membranpartien bloß auf der einen Seite der Zellen, so wird diese Seite verkürzt und es tritt eine Krümmung ein. Bewegungen, denen der ersterwähnte Mechanismus zugrunde liegt, heißen hygroskopische Bewegungen, während solche, die nach dem zweiten Prinzip ausgeführt werden als Kohäsionsbewegungen bezeichnet werden. Im folgenden wollen wir jede dieser Bewegungsarten durch einige Beispiele noch etwas näher erläutern.

3a) Hygroskopische Bewegungen. Als erstes Beispiel wollen wir die allbekannte Jerichorose, Anastatica hierochuntica anführen. Zur Zeit, wo die Früchte reifen, trocknen die abstehenden Zweige dieser Crucifere ein, wobei sie sich auf der Oberseite viel stärker verkürzen, als auf der Unterseite. Das hat zur Folge, daß sich die Zweige sämtlich nach innen einkrümmen. Legen wir

die Pflanzen in diesen Zustand in Wasser, so krümmen sich die Zweige wieder auswärts. Die Krümmungen sind also hygroskopischer Art und werden nur durch den Holzkörper der Aeste bewirkt. Dieser Holzkörper ist



Fig. 18. Hülsen von Orobus vernus. An der linken Hülse haben sich die Klappen voneinander gelöst und eine Windebewegung ausgeführt. Nach Kerner.

weitaus zum größten Teil aus Holzfasern aufgebaut und zwar so, daß er an der Unterseite der Aeste beträchtlich stärker entwickelt ist, als an der Oberfläche. Die Fasern der Unterseite sind stark verholzt, und wenig quellbar. Für die Fasern der Oberseite gilt gerade das Umgekehrte, sie sind nur schwach verholzt, aber stärker quellbar. Die Oberseite verliert deshalb beim Austrocknen mehr Wasser, und verkürzt sich somit stärker als die Unterseite, wodurch eine Einkrümmung des Astes zustande kommt.

Eine Krümmung durch Austrocknen tritt auch dann ein, wenn die Quellbarkeit in der Längsrichtung der Zelle anders ist, als in der Querrichtung, wobei aber notwendig ist, daß die Längsrichtungen der Zellen an den antagonistischen Flanken sich kreuzen. Ein solcher Mechanismus findet sich in den Kapselklappen von Syringa. Die Krümmung wird bewirkt durch eine Schicht derbwandiger Zellen, die in der Querrichtung stärker quellbar sind, sich deshalb beim Austrocknen stärker verkürzen als in der Längsrichtung. Die innersten Zellen der Hartschicht sind längs gelagert, während die äußersten quer oder schief angeordnet sind. Beim Austrocknen verkürzt sich somit die Außenseite stärker als die Innenseite und die Zähne werden nach auswärts gekrümmt.

Nicht nur Krümmungen, sondern auch Windebewegungen werden infolge Austrocknens ausgeführt. Sehr schön ist das bei den Papilionaceen zu sehen (Fig. 18), deren Hülse sich bei der Reife in zwei Klappen aufspaltet, die nun korkzieherartige Windungen machen und zwar so, daß die Innenschicht der Klappen in den Windungen nach innen liegen. Unter der inneren Epidermis der Klappen befindet sich eine Hartschicht und diese Schicht ist es, die allein die Krümmung bewerkstelligt. Sie besteht aus langgestreckten Zellen, wovon die zu innerst gelegenen sehr stark quellbar sind, die äußersten hingegen gar nicht. Alle diese Fasern liegen nun nicht parellel zur Längsachse der Klappe, in welchem Fall beim Austrocknen eine einfache Einwärtskrümmung eintreten würde, sondern sie bilden mit der Längsachse einen spitzen Winkel. Die Krümmung tritt deshalb schief zur Klappenachse ein und deshalb wird die Klappe schraubenartig gedreht.

Bekannt sind die Windungen der Grannen an den Teilfrüchtchen des Reiherschnabels, Erodium cicutarium (Fig. 19). Die Granne besteht der Hauptsache nach aus Fasern, von denen aber bloß eine Zone für das Winden in Frage kommt. Isoliert



Fig. 19. Teilfrüchtchen von Erodium gruinum. A in trockenem Zustand, aufgerollt. B im feuchten Zustand, gerade gestreckt. Aus dem „Lehrbuch der Botanik usw."

man diese Zone und läßt sie austrocknen, so windet sie in gleichem Sinne, wie die intakte Granne. Man kann sogar noch weiter gehen und einzelne Fasern dieser Zone herauslösen und austrocknen lassen. Die so behandelten Fasern winden dann genau gleich wie die ganze Granne. Daraus geht hervor, daß die Ursache des Windens in der Struktur der Membran der einzelnen Grannen gesucht werden muß. Die Membran muß nach verschiedenen Richtungen verschieden stark quellbar sein und zwar so, daß die Richtung stärkster Quellbarkeit mit der Längsrichtung der Faser einen spitzen Winkel bildet.

3b) Kohäsionsbewegungen. Auf Kohäsionsmechanismus beruht die Oeffnungsbewegung der Sporangien der Polypodiaceen. Diese Sporangien besitzen einen

Annulus, d. h. eine Reihe von Zellen, die von der Basis auf der einen Seite des Sporangiums heraufsteigt und noch stwas über den Scheitel hinübergreift. Die Zellen des Annulus sind

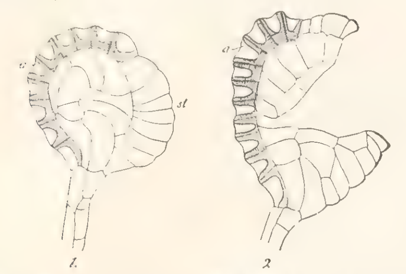


Fig. 20. Polypodiaceensporangium. a Annulus. st unverdickte Zellen, die den Annulus fortsetzen. 1. Ungeöffnet, 2. geöffnet. Nach Jost.

in äußerst charakteristischer Weise konstruiert. Ihre Innenwände sind stark verdickt, ebenso ihre Seitenwände, wo aber die Verdickungen nach außen allmählich auskeilen (Fig. 20). Sehr davon verschieden sind schließlich nicht mehr Stand halten kann und mit einem Querriß aufreißt. Die Kontraktion der Außenseite des Annulus kann schließlich soweit gehen, daß sich ganz nach hinten umbiegt. Schließlich aber wird die Spannung der nach innen gezogenen Außenwände so stark, daß sie die Kohäsion des Wassers überwindet. Die Wassermasse in der Zelle wird

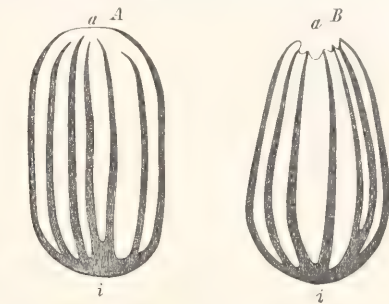


Fig. 22. Isolierte Zellen der mechanischen Schicht der Antherenwand von Lilium candidum. Halbschematisch. A im befeuchteten, B im ausgetrockneten Zustand. a Außenwand, i Innenwand. Nach Steinbäule.

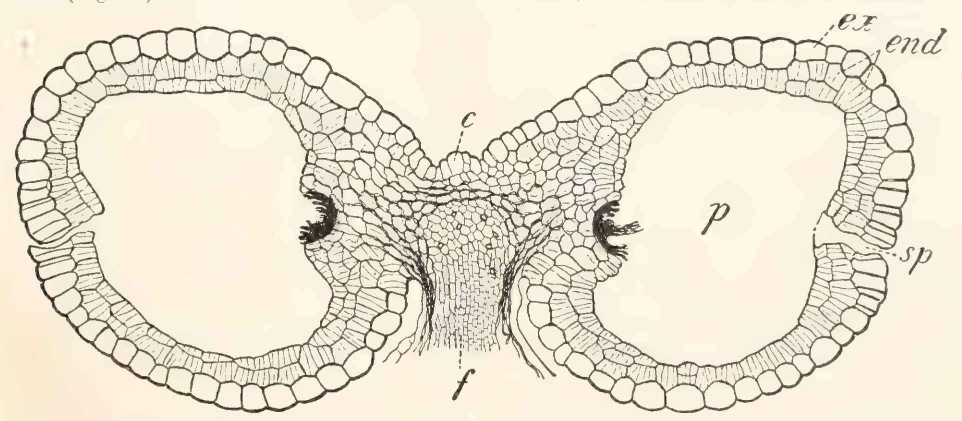


Fig. 21. Querschnitt durch eine reife Anthere von Syringa. p die leeren Pollensäcke. ex = die Außenschicht der Pollensackwand. end = die mechanische Schicht, die das Oeffnen der Pollensäcke bewirkt. Nach Wettstein.

die Außenwände, die ganz dünn sind. Die Zellen des Annulus sind mit Wasser angefüllt. Wenn sie nun durch Verdunstung Wasser verlieren, so wird der Zusammenhang des Wassers mit der Membran nicht gelöst, da die Adhäsion sowohl wie die Kohäsion des Wassers unter den gegebenen Bedingungen sehr groß ist. Da aber Wasser aus dem Zellinnern verloren gegangen ist, so wird das Volumen des zurückgebliebenen Wassers kleiner und die Folge davon ist, daß die dünne Außenwand in die Zelle eingezogen wird. Das bewirkt seinerseits eine Verkürzung der Außenseite des Annulus. Dadurch kommt eine Zugwirkung zustande, sie sich auf die dem Annulus gegenüberliegende Seite des Sporangiums weiter pflanzt, die dem Zug durchgerissen, es tritt Luft ein und der Annulus geht mit einem Ruck in seine ursprüngliche Lage zurück.

Auf ganz ähnliche Weise erfolgt die Oeffnung der Antherenfächer der Phanerogamen. Die Anthere enthält 4 Pollenfächer, 2 auf jeder Seite. Die Oeffnung geschieht durch einen Längsriß, wobei sich die Wände der Pollenfächer nach außen zurückkrümmen. Diese Bewegung wird verursacht durch die unter der Epidermis liegende sogenannte mechanische Schicht (Fig. 21). Die Zellen dieser Schicht besitzen faserförmige Verdickungsleisten, die in der Mitte der Innenwand ihren Ursprung nehmen und von hier aus, wie Strahlen eines Sternes auf die Seitenwände übergreifen, ohne die Außenwände

zu erreichen (siehe Fig. 22). Die zwischen den Strahlen liegenden Teile der Seitenwände sind, wie die Außenwände dünn. Wenn nun diese Zellen Wasser verlieren, so legen sich unter dem Einfluß des Zuges des Füllwassers die dünnen Membranpartien der Seitenwände in Falten. Dadurch wird das Volumen der Zellen vermindert und es entsteht in der mechanischen Schicht eine Zugspannung, die endlich zur Bildung eines Risses führt.

Literatur. ***G. Berthold,*** *Studien über Protoplasmamechanik. Leipzig 1886.* — ***L. Jost,*** *Vorlesungen über Pflanzenphysiologie, 2. Aufl.* — ***K. Kerstan,*** *Ueber den Einfluß des geotropischen und heliotropischen Reizes auf den Turgordruck in den Geweben. Beiträge zur Biologie der Pflanze, Bd. 9, 1909, S. 163. Auch als Dissertat. Leipzig 1907.* — ***W. W. Lepeschkin,*** *Zur Kenntnis des Mechanismus der photonastischen Variationsbewegungen und der Einwirkung des Beleuchtungswechsels auf die Plasmamembran. Beihefte z. botan. Zentralblatt, Bd. 24, 1909, S. 308.* — ***Graf H. Luxburg,*** *Untersuchungen über den Wachstumsverlauf bei der geotropischen Bewegung. Jahrb. f. wissenschaftl. Botanik, Bd. 41, 1905, S. 399.* — ***P. Meischke,*** *Ueber die Arbeitsleistung der Pflanzen bei der geotropischen Krümmung. Jahrb. f. wiss. Bot., Bd. 33, 1899, S. 337.* — ***W. Pfeffer,*** *Pflanzenphysiologie I u. II, 2. Aufl. Leipzig 1897 u. 1904.* — ***Derselbe,*** *Die periodischen Bewegungen der Blattorgane. Leipzig 1875.* — ***Derselbe,*** *Druck- und Arbeitsleistung durch wachsende Pflanzen. Abhdlg. d. math.-nat. Klasse d. kl. sächs. Ges. d. Wissenschaften, Bd. 20, 1893, S. 233.* — ***J. Sachs,*** *Längenwachstum der Ober- und Unterseite horizontal gelegter sich aufwärts krümmender Sprosse. Arbeiten d. botan. Inst. in Würzburg, Bd. I, 1874, S. 193.* — ***Derselbe,*** *Ueber das Wachstum der Haupt- und Nebenwurzeln, do. S. 385 u. 584.* — ***G. Senn,*** *Die Gestalts- und Lageveränderung der Pflanzen-Chromatophoren. Leipzig 1908.* — ***Strasburger, Jost, Schenk und Karsten,*** *Lehrbuch der Botanik, 11. Aufl. Jena 1911.* — ***Warming-Johannsen,*** *Lehrbuch der allgemeinen Botanik. Berlin 1909.*

A. Tröndle.

Bewegungsorgane der Tiere.

1. Definition und Verschiedenartigkeit der Bewegungsorgane. Als Bewegungsorgane der Tiere sind alle tierischen Organe zu bezeichnen, die eine Bewegung hervorbringen, ohne Rücksicht darauf, was im Einzelfalle bewegt wird; so sind im Grunde genommen, das Herz oder der kontraktionsfähige Ausfuhrgang einer Drüse Bewegungsorgane für das Blut bezw. das Drüsensekret; die auf der Körperoberfläche sitzenden Ruderwimpern, mit deren Hilfe sich festsitzende Protozoen und vielfach auch niedere Metazoen ihre Nahrung oder ihre Atemluft im Wasser heranstrudeln, sind Bewegungsorgane für das umgebende Wasser; die Gliedmaßen und sonstigen Vorrichtungen, welche eine Ortsveränderung des Tieres vermitteln, sind Bewegungsorgane für den Tierkörper in seiner Ganzheit betrachtet selbst. Es hat sich indes der Brauch entwickelt, daß man unter Bewegungsorganen im allgemeinen nur diejenigen Organe der letztgenannten Art bezeichnet, die dem betreffenden Organismus eine Ortsveränderung gestatten, die also die „Lokomotion" zuwege bringen, die das Tier zum Zwecke des Nahrungserwerbes, zum Aufsuchen geeigneter Lebensbedingungen, zum Zusammenfinden der Geschlechter, zum Ausstreuen der Nachkommenschaft und um Angriffen zu entgehen, notwendig hat und die darum kein Tier, wenigstens auf gewissen Stadien seines Entwickelungsganges, ganz entbehrt. In genauerer Ausdrucksweise sind derartige Bewegungsorgane als lokomotorische zu bezeichnen, während für diejenigen Organe, die eine Verlagerung verschiebbarer Medien innerhalb oder außerhalb des Tierkörpers ohne Ortsveränderung des Tierkörpers selbst herbeiführen, eine zusammenfassende Bezeichnung zurzeit noch fehlt; sie mögen hier transvektorische Bewegungsorgane genannt werden, weil sie bewegbare Massen irgendwelcher Art von einem Ort zu einem anderen überführen (transvehere = überführen).

Die Trennung der transvektorischen und der lokomotorischen Bewegungsorgane ist jedoch nicht überall eine scharfe; dieselbe Wimperschnur, die einem festsitzenden Infusor, einer Vorticelle z. B., zum Herbeistrudeln der Nahrung auf transvektorischem Wege dient, wird zu einem lokomotorischen Bewegungsorgane, sobald die Vorticelle sich von ihrer Anheftung frei macht und nun der Ruderschlag der Wimpern das Infusor wie ein Ruderboot durch das Wasser trägt, während vorher, dem Ruderschlag in

einem festgelegten Boote vergleichbar, das gleiche Ruderwerk das Wasser mit seinen Beuteteilchen nach dem festsitzenden Tiere hin strudelte. Man wird sich in solchen Fällen dadurch helfen können, daß man die Hauptfunktion eines Bewegungsorganes bei seiner Zuteilung in eine der beiden Gruppen als ausschlaggebend wählt und die Nebenfunktion durch irgendeinen Zusatz zu erkennen gibt; die spirale Wimperschnur der Vorticelle könnte man dementsprechend als ein transvektorisches Bewegungsorgan mit bedingungsweiser lokomotorischer Nebenfunktion bezeichnen, u. dgl. m.

Die transvektorischen Bewegungsorgane treten vorzugsweise in zweierlei Formen auf, erstens als Flimmer- und Geißelzellen, die sich zu größeren Epithelien zusammenstellen können und zweitens in Form von muskulösen Hohlschläuchen, deren Muskelanordnung eine Kontraktion des Schlauches an bestimmten Stellen unter gleichzeitiger Ausdehnung desselben an anderen Stellen und hierdurch ein Fortgepreßtwerden der im Schlauchinneren befindlichen, beweglichen Substanz (Blut, Leibeshöhlenflüssigkeit, Drüsensekrete u. dgl.) von den Zusammenschnürungsstellen nach den Ausdehnungsstellen zu vermitteln vermag.

Viel gestaltungsreicher und wechselnder in ihren Mitteln sind die lokomotorischen Bewegungsorgane; sie haben mit den transvektorischen Bewegungsorganen zwar das gemeinsam, daß ihre Bewegungen in erster Instanz durch die Kontraktilität des Protoplasmas herbeigeführt werden, sie stehen aber stets, was bei jenen nicht immer der Fall ist, mit der äußeren Oberfläche des Tieres in irgendwelcher Beziehung und zeigen vor allem mehr oder weniger hochgradige Anpassungen an die Außenmedien, die bei der Lokomotion überschritten oder durchwandert werden müssen. So ergibt sich eine große Mannigfaltigkeit, die einerseits sich danach richtet, ob die Tiere im Wasser, auf oder in der Erde oder in der Luft ihre Ortsbewegungen vollziehen, die andererseits aber auch stark durch die Bewegungsart selbst beeinflußt wird. In letzterer Hinsicht liegen bekanntlich große Verschiedenheiten vor, die einen, wie z. B. Regenwürmer oder Schlangen kriechen durch gleitende oder schlängelnde Bewegungen, andere, wie Blutegel und Spannerraupen, schreiten schrittweise spannernd, indem sie sich abwechslungsweise vorn und hinten mit Saugnäpfen oder Beinen festhalten, andere schwimmen mit Flossen irgendwelcher Art, wie z. B. manche Mollusken und Fische oder mit Hilfe der Wimpern der äußeren Haut, wie z. B. die Infusorien und Turbellarien oder mit Ruderplättchen, die aus der Verschmelzung von Wimpern entstanden sind, wie die Ctenophoren oder durch Rückstoß, indem sie Wasser aus Hohlräumen ihres Körpers ruckweise ausstoßen wie z. B. viele Cephalopoden, Salpen und die Quallen; die Echinodermen besitzen in ihrem Ambulakralgefäßsystem einen ganz eigenartigen Bewegungsapparat; die Arthropoden, Vögel und Säugetiere bewegen sich laufend, kletternd und springend, Insekten und Vögel fliegen u. dgl. m. Für all diese mannigfaltigen Bewegungen sind mehr oder weniger hochentwickelte Bewegungsorgane vorhanden, deren Ausbau im Einzelfalle außer von den notwendigen Anpassungserscheinungen in erster Linie von den stammesgeschichtlich (phylogenetisch) überkommenen Werkzeugen abhängt, welche diesen Anpassungen unterworfen wurden. So ist beispielsweise die Vorderflosse der Wale anders gebaut, wie die Brustflosse der Fische, denn sie ist durch Anpassung aus der pentadactylen Gliedmaße der Landsäugetiere entstanden, während die Fischflosse dem pentadactylen Extremitätentypus, der erst mit dem Landleben in Erscheinung tritt, noch ganz ferne steht. Zu einem richtigen Verständnis der Bewegungsorgane ist daher ein Ueberblick über die Phylogenie der Organteile, aus welchen sich die Bewegungsorgane hervorgebildet und für Spezialfälle modifiziert haben, unerläßlich.

2. Phylogenetische Uebersicht: Pseudopodien, Flimmerhaare, Myoneme, Muskeln, Skeletteile, Extremitäten. Wie sich erwarten läßt, trifft man die einfachsten Bewegungsorgane bei Protozoen an. Die niedersten Gruppen der Rhizopoden bewegen sich hier nämlich mit Hilfe von Pseudopodien; d. h. mit Hilfe von vor- und zurückfließenden Hervorragungen der protoplasmatischen Körperoberfläche, die selbst wieder sehr verschiedene Formen annehmen können, indem sie in den verschiedenen Untergruppen bald lappig „lobos", bald fadenförmig „filos", bald netzförmig verzweigt, „retikulos", erscheinen. Während lobose und filose Pseudopodien auf ihrer Oberfläche hyalin bis gallertig und in ihren axialen Partien dünnflüssiger erscheinen, zeigen die retikulosen Pseudopodien umgekehrt eine dünnflüssigere Rinde, in der kleine Körnchen, die sogenannte „Körnchenströmung" verursachend, sich mit großer gegenseitiger Unabhängigkeit hin und her bewegen, und außerdem eine zähflüssigere Axenpartie, die sich jedoch in der Regel gegen die leichtflüssige Rindenschicht nur wenig scharf absetzt. Das sehr wechselnde Gestaltungsspiel, das durch das Ausfließen der Pseudopodien an manchen Stellen des Körpers und durch das oft gleichzeitige Einziehen von Pseudopodien an anderen Stellen des Weichkörpers entsteht, bezeichnet man als „amöboide Beweglichkeit"; diese ist nicht auf die Rhizopoden beschränkt sondern hat sich auch bei einzelnen Zellgruppen des Metazoenkörpers erhalten. So vermögen die

Eizellen der Spongien und Coelenteraten amöboide Wanderungen innerhalb der sie bergenden Körpergewebe vorzunehmen; in weitester Verbreitung enthält die Leibeshöhlenflüssigkeit oder das Blut noch irgendwelche Arten von amöboid beweglichen Zellen; weit seltener sind bei niederen Metazoen die Darmepithelzellen zu amöboider Nahrungsaufnahme durch Pseudopodienbildung befähigt, und mehr vereinzelt kommen auch sonst noch amöboid veränderliche Zellen im Metazoenkörper vor, wie z. B. als bewegliche Bindegewebszellen oder innerhalb der Fußplatte der Hydra u. dgl. m.

Entgegen der im steten Flusse begriffenen Vielgestaltigkeit der Pseudopodien stellen die sogenannten Flimmerhaare konstantere, haarförmige Protoplasmafortsätze der Zelloberfläche, sozusagen in ihrer Stellung und Längenerstreckung „fixierte" Pseudopodien (zu denen sie auch Uebergänge zeigen) dar, die durch geeignete Hin- und Herkrümmungen als Bewegungsorgane funktionieren. Man bezeichnet diese beweglichen Flimmerhaare als „Geißeln" oder Flagellen, wenn sie besonders langgestreckt und der Zelloberfläche nur in geringer Zahl, zu eins, zwei oder höchstens sechs, aufgesetzt sind, als Wimpern oder Cilien aber dann, wenn sie nur relativ kurz entwickelt in großer Zahl die Zelloberfläche oder gewisse Strecken derselben übersäen; die Cilien ersetzen durch ihre Anzahl, was ihnen an Länge den Flagellen gegenüber fehlt, und können außerdem ihre Wirksamkeit noch weiter steigern oder sonstwie modifizieren, indem sie bündelweise zu Cirren oder reihenweise zu sogenannten undulierenden Membranen verwachsen. Unter den Protozoen bewegen sich die Flagellaten mit Hilfe von Flagellen, die Infusorien aber, die darum auch Ciliaten heißen, mit Cilien. Beiderlei Bewegungsorgane kommen auch bei gewissen Zellgruppen von Metazoen vor (vgl. weiter unten), wo sie aber nicht immer lokomotorischen sondern häufiger noch transvektorischen Aufgaben dienen.

Neben der amöboiden Bewegung und dem Ruderspiel der Wimpern findet sich im Bereich der Protozoen auch bereits die, erst bei den Metazoen zur eigentlichen Vorherrschaft gelangende, Bewegung durch Muskeln, vorbereitet und eingeleitet durch das Auftreten kontraktiler Fäden, die auf bestimmte Reize hin sich zusammenziehen und dadurch je nach ihrer Lagerung Krümmungen und sonstige Gestaltveränderungen des Tieres und hierdurch auch Ortsveränderungen desselben herbeizuführen vermögen. Derartige kontraktile Fäden heißen Myoneme oder Myophane oder Myoide. Sie finden sich bei gewissen Flagellaten (Trypanosomen), bei zahlreichen Ciliaten und Gregarinen dicht unter der Pellicula, durchziehen meistens die Längsdimensionen des Körpers, seltener (Gregarinen) sind sie als Ringfaserschicht entwickelt.

Bei der größten Ueberzahl der Tiere sind die aus Zellen entstandenen Muskelfasern die Urheber lokomotorischer Bewegungserscheinungen. Die Muskelfasern gruppieren sich mit Hilfe von zwischengelagerten und umhüllenden Bindegewebe zu größeren Gefügen, die man Muskeln nennt.

In vielen Fällen, z. B. bei den ungegliederten Würmern bildet die, flächenartig der Haut angelagerte, Muskulatur einen sogenannten Hautmuskelschlauch, welcher gleichzeitig mit der Körperhaut die inneren Organe des Tieres umschließt. Ein solcher Hautmuskelschlauch enthält zumeist zwei oder mehr Schichten, verschieden gelagerter Muskelfasern, z. B. eine zu äußerst liegende Schicht von solchen Muskeln, deren Fasern ringsum quer zur Längsachse des Tieres verlaufen, und die darum dann äußere Ringmuskelschicht heißt, und eine zweite innere Längsmuskelschicht, deren Fasern unterhalb der äußeren Ringmuskeln längsgerichtet sind, oder das Verhältnis kann sich umkehren, so daß die Längsmuskeln außen der Körperhaut anliegen, die Ringmuskeln aber weiter innen liegen; auch schiefgerichtete und dorsoventral verlaufende Muskelzüge kommen im Hautmuskelschlauch vor. Die Fähigkeit des Hautmuskelschlauches, die Lagerung seiner Muskeln in sehr mannigfaltiger Weise zu modifizieren, hat im Verein mit der Fähigkeit, auch die Menge der Muskeln nach Bedarf zu steigern oder zu reduzieren, zur Ausbildung sehr verschiedenartiger Bewegungsorgane an bestimmten Körperstellen geführt.

So wird der Fuß und die Kriechsohle der Mollusken viel reichlicher mit Muskeln beschickt als die übrigen Teile der Körperoberfläche, die z. T. ihre Muskeln ganz zurückbilden; oder die Mantelfalten und die eigentümliche trichterförmige Fußbildung, welche die Kiemenhöhle der Cephalopoden einschließen, erhalten eine so starke Muskulatur, daß sie das Wasser mit einer zur Fortbewegung des Tieres ausreichenden Gewalt (vgl. weiter unten) aus der Trichteröffnung herauszuschleudern vermögen, während anderenorts die Körpermuskulatur starke Rückbildung erfährt u. dgl. m. Dadurch, daß die Muskulatur mit der Körperoberfläche mehr oder weniger innig verbunden bleibt, werden auch Körperfortsätze, welche der Körper etwa sonst noch außer dem schon genannten Fuß der Mollusken zu irgendwelchen Sonderfunktionen auszutreiben vermag, mit Muskeln und manchmal recht erheblicher selbständiger Beweglichkeit ausgestattet, so z. B. die lokomotorisch arbeitenden Ambulakralfüßchen der Echinodermen (cf. weiter unten), dann die bei Mollusken mehrfach vorkommenden, zum Schwimmen dienenden Flossenanhänge, dann die Fühler, die ihre Beweglichkeit zur Ab-

tastung und, sofern sie Augen tragen, auch zur Besichtigung der Umgebung benutzen, und schließlich die „Tentakel“. Die Tentakel sind langgestreckte Körperfortsätze von besonderer Beweglichkeit in der Umgebung des Mundes, welche, ähnlich den Fühlern reich mit Sinneswerkzeugen versehen, als Tastorgane oder auch als Organe zum Ergreifen, Festhalten und Ueberwältigen der Beute dienen; im letzten Falle werden sie auch als Fangarme bezeichnet. Temporär festgeheftete Formen, wie die Süßwasserhydra, benutzen dann wohl auch derartige Fangtentakel nach Stelzenart oder indem sie sich an entferntere Gegenstände mit den Tentakeln anklammern und dann die Fußscheibe nachziehen, um vom Fleck zu kommen; auch die Oktopoden unter den Cephalopoden gebrauchen ihre Fangarme in ähnlicher Weise. Im übrigen aber bleibt das Tentakelwerk für eine weitere höhere Ausbildung von Lokomotorien aus unbekannten Gründen ganz steril.

Am bedeutungsvollsten, d. h. phylogenetisch am fruchtbarsten, wird die Anordnung der Muskulatur dann modifiziert, wenn der Körper des Tieres und namentlich auch dessen Körperbedeckung in eine Anzahl gegeneinander mehr oder weniger verschiebbarer, hintereinander liegender Abschnitte, Segmente, zerfällt. Dann wird nämlich auch der Hautmuskelschlauch den Segmenten entsprechend derart unterbrochen, daß sich der Einzelmuskel mit seinem einen Ende in einem bestimmten Segment, mit seinem anderen Ende aber in einem anderen Segment anheftet; der früher einheitliche Schlauch wird somit in zahlreiche Muskelgruppen geschieden, die die Bewegung der einzelnen Segmente gegeneinander zu bewerkstelligen haben. Die Lokomotion des Tieres kommt dann durch ein von dem Nervensystem geregeltes Zusammenwirken der Segmentmuskulatur zustande. Treten nun auch noch besondere, zur Unterstützung oder zur ausschließlichen Erzeugung der Bewegung bestimmte Gliedmaßen, Extremitäten, an den Segmenten als seitliche oder ventral gerichtete Anhänge des Rumpfes auf, so erhalten diese ihre besondere Muskulatur, die man als Gliedmaßenmuskulatur, der Stamm und Rumpfmuskulatur gegenüberstellt. Bei der Entstehung solcher Extremitäten spielen äußere (Chitinpanzer der Arthropoden) oder innere (Knochengerüst der Vertebraten) Skeletteile, welche den Muskeln als Ansatzpunkte dienen und durch die Kontraktion der Muskulatur einander genähert oder voneinander entfernt werden können, eine die ganze Gliederung und Wirkungsweise der Extremität beherrschende Rolle; ihnen heften sich die Muskeln als Streckmuskeln, Beugemuskeln, Abziehmuskeln, Anziehmuskeln usw. mit Hilfe von bindegewebigen Strängen, den Sehnen, in funktionell zweckmäßiger Weise an.

Im gleichen Maße, wie mit der fortschreitenden Stammesentwickelung die zur Lokomotion erforderliche Muskulatur von der Hauptachse des Rumpfes auf die Extremitäten übertritt, und auf diese Weise die Bedingungen zur Ausführung von schwierigeren und vollkommeneren Arten der Lokomotion erhält, verliert im allgemeinen die Segmentierung des Rumpfes die Verschiebbarkeit und Gleichartigkeit seiner Teile mehr und mehr, es werden fester und in verschiedener Weise zusammengeschlossene Körperstrecken als Kopf, Hals, Brust, Lendengegend, Schwanz, Abdomen und Postabdomen u. dgl. gebildet oder mit anderen Worten, die vorher „homodyname“ Rumpfgliederung wird „heterodynam“, indem einzelne Körperabschnitte in höherem oder geringerem Grade der Beteiligung an der Lokomotion entzogen (Kopf, Abdomen der Insekten usw.) und in andere Berufe eingestellt oder in bestimmten Berufen stärker als in anderen spezialisiert werden (Kopf = Träger der Organe für die Nahrungsaufnahme und der höheren Sinnesorgane; Abdomen der Insekten = Verwertungsapparat für die Nahrung, Atemapparat u. dgl.). Auch läßt sich im allgemeinen sagen, daß sich der Rumpf um so mehr verkürzt, je mehr die Lokomotion den Extremitäten überantwortet wird.

2a) Gegliederte Extremitäten bei Wirbellosen. Bei den Wirbellosen führen nur die, mit einem festen Außenskelett versehenen, Arthropoden gegliederte Extremitäten. Die Grundform dieser Extremitäten wird allgemein von den Parapodien mariner Polychäten, d. h. von ungegliederten, meist aber zweiästigen an ihren Enden Borsten tragenden Ruderlappenanhängen abgeleitet, die sich zu je einem Paar seitlich an jedem Körpersegment dieser Gliederwürmer finden; diese Anhänge haben durch eine gelenkige Quergliederung den Charakter der Extremitäten im Bereich der Athropoden angenommen. Der Zweiästigkeit des Parapodiums entsprechend erscheint die Grundform des Beines der wasserlebigen Crustaceen als gegabelte Gliedmaße, die man als „Spaltfuß“ oder „Schwimmfuß“ bezeichnet; ein unpaarer, aus zwei Gliedern bestehender Stamm spaltet sich distal in einen Innen- und Außenast, den sogenannten Schwimmfußast (= Exopodit) und den Gehfußast (= Entopodit), und jedes Körpersegment scheint von Haus aus befähigt, ein derartiges Spaltfußpaar zu tragen, wenn auch niemals alle Segmente von dieser Fähigkeit in gleicher Weise Gebrauch machen und wenn auch oft der ursprüngliche Spaltfußcharakter durch Verlust eines Astes verloren geht, z. B. stets bei den ersten Antennen, oder auch die ursprüngliche Funktion der Extremitäten als Bewegungsorgane mit anderen Funktionen kombiniert oder ganz vertauscht wird, ein Geschehnis, dem in der besonderen Bezeichnung der betreffenden Extremitäten — als Antennen für Sinnesorganträger (bei Crustaceen stets zwei Paare), als Kiefer und Kieferfüße für Freßwerkzeuge, als „Füße“ oder „Pereiopoden“

für die lokomotorischen Bewegungsorgane und schließlich als „Afterfüße“ oder als „Stummelfüße“ (Pedes spurii) oder auch Pleopoden für rückgebildete oder doch unscheinbar entwickelte Spaltfüße wechselnden Berufes [1]), die am hinteren Abschnitte des Rumpfes, am sogenannten Abdomen, aufgestellt sind — Rechnung getragen wird.

Die lokomotorischen Pereipoden sind langgestreckt und aus einer relativ großen aber wechselnden Anzahl gut entwickelter Glieder gebildet, die entweder zu Rudern abgeplattet oder zum Zwecke des Kriechens am Ende mit Krallen ausgerüstet sind; Anzahl, Anordnung und Ausbau der Extremitäten ist bei den verschiedenen Gruppen der Crustaceen indessen recht verschieden.

Bei den luftlebigen Arthropoden, den Tracheaten, sind die Bewegungsorgane nie Spaltfüße sondern stets einreihig; auch ist stets nur ein Antennenpaar vorhanden. Sehr primitive an die Parapodien der Anneliden durch undeutliche Gliederung und wenig scharfe Absetzung erinnernde Extremitäten tragen die P r o t r a c h e a t e n an sämtlichen Rumpfsegmenten, sie enden mit Klauen. Auch die M y r i a p o d e n bringen zumeist noch an allen Körpersegmenten Beinpaare zur Ausbildung; an den letzten Körpersegmenten können solche aber auch hier bereits zum Ausfall kommen und überdies ist die Quergelenkung der Beine nunmehr in der Aufeinanderfolge von 6 bis 7 Gliedern, von denen das Endglied als Klaue funktioniert, deutlich ausgeprägt. Innerhalb der Untergruppe der Diplopoden tragen die meisten Segmente scheinbar sogar zwei Beinpaare; es handelt sich hierbei aber um sekundär verschmolzene Doppelsegmente.

Die A r a c h n o i d e n haben die Anzahl der Extremitäten tragenden Körpersegmente auf sechs in ihrem Cephalothorax fixiert; von den Extremitäten dienen stets vier Paare als Beine, deren sieben Glieder oft sehr lang und deren Endglieder mit zwei Klauen ausgerüstet sind. Die Achtzahl der Beine ist darum für die Arachnoideen charakteristisch; die beiden ersten vor den Beinen gelegenen in der Mundgegend aufgestellten Extremitätenpaare werden als Kieferfühler (Cheliceren) und die dahinter liegenden als Kiefertaster (Pedi- oder Maxillipalpen) unterschieden und funktionieren als Freßwerkzeuge; das Abdomen entbehrt eigentlicher Extremitäten ganz, doch sind die Spinnwarzen der Araneen wahrscheinlich als rudimentäre Bauchextremitäten aufzufassen. Auch bei den I n s e k t e n ist die Anzahl der am Kopf und an der Brust sitzenden Extremitätenpaare genau fixiert und beträgt hier sieben Paare; das Abdomen besitzt beim entwickelten Insekt keine Extremitäten oder doch nur in den primitiveren Ordnungen Rudimente oder in ihrer phylogenetischen Deutung nicht ganz unstrittige Abkömmlinge von solchen (Styli und Cerci); dagegen kommen bei den Larvenzuständen von Schmetterlingen, Blattwespen und einigen Dipteren fleischige ungegliederte, zum Kriechen benutzte Abdominalanhänge vor, die möglicherweise, sofern sie nicht selbständig, sekundär erworbene Gebilde sind, als Abdominalfüße aufzufassen sind; man bezeichnet sie auch einer solchen Auffassung entsprechend als Afterfüße oder Pedes spurii. Von den sieben Extremitätenpaaren fallen vier, als ein Antennen- und drei Freßwerkzeugpaare, dem Kopfe zu, während als lokomotorische Bewegungsorgane drei auf dem Thorax eingelenkte Beinpaare dienen („Hexapoden“).

Die Beine selbst haben eine sehr bestimmte Gliederung in kürzere und längere Bestandteile angenommen; sie sind an den drei Thoraxsegmenten zwischen den sternalen und pleuralen Anteilen derselben mit dem häufig kurzen, in eine Art Pfanne eingelenkten Hüftglied (Coxa) befestigt; auch das zweite, zuweilen jedoch (Ditrocha unter den Hymenopteren) in zwei Unterteile zerfallene Glied, der Schenkelring oder Trochanter, ist gewöhnlich kurz, während die beiden folgenden Stücke stets langgestreckt sind; das nächste, also das dritte der Reihe, enthält hauptsächlich die Muskulatur, ist darum verdickt und heißt Femur, das vierte ist die schlanke aber sehr feste Tibia. Der fünfte Endabschnitt der Beine setzt sich aus einer Reihe kleiner Glieder zusammen, von denen das letzte in der Regel zwei, seltener nur eine Klaue trägt, man faßt sie unter dem Ausdruck „Tarsus“ zusammen und spricht je nach der Anzahl dieser Tarsalglieder von einem 2-, 3-, 4- oder 5 gliedrigen Tarsus. Die einzelnen Abschnitte der Beine sind meist derart aneinandergelenkt, daß das Hüftglied und der Trochanter mit dem Femur einen nach der Dorsalseite offenen spitzen Winkel bilden, während Femur und Tibia einen spitzen Winkel nach der Ventralseite öffnen, auch der Tarsus pflegt sich mehr oder weniger scharf von dem unteren Ende der Tibia abzuwinkeln, d. h. nicht in der gleichen Achse mit der Tibia zu verlaufen.

Außer den ventralen Extremitäten besitzen die Insekten jedoch noch in ihren zwei Paar dorsalen, am Mesothorax und Metathorax eingelenkten „F l ü g e l n“, Bewegungswerkzeuge, die nur ihnen zukommen, zum Fliegen in der Luft. Diese Flügel fehlen primär nur den Apterygoten, die niemals Flügel besessen zu haben scheinen; sie sind aber in mehreren Fällen sekundär zur Rückbildung gelangt, wie sich daraus entnehmen läßt, daß entweder die nächsten Verwandten (bei Wanzen, Läusen, Blattläusen) noch Flügel tragen, oder daß sogar noch ein Teil der Individuen seine Flügel behalten hat (♂ der

[1]) Die Pleopoden können als Kiemen oder Kiementräger funktionieren, als Träger der Eier oder zur Ueberführung des Sperma, oder sie unterstützen auch das Schwimmen und Kriechen.

Schaben, ♂ der Frostspanner, Geschlechtstiere bei Ameisen und Termiten). Der Prothorax, der bei recenten Insekten stets flügellos ist, soll bei manchen Archipteren der Steinkohlenformation noch Flügelrudimente getragen haben. Diese Flügel werden neuerdings als seitlich abgegliederte Faltungen des Notums von Meso- und Metathorax angesehen, während man sie früher (L u b b o c k) von umgewandelten Tracheenkiemenblättchen, wie sie manchen im Wasser lebenden Ephemeridenlarven zukommen, ableiten wollte; sie bestehen aus zwei dicht aufeinanderliegenden Chitinlamellen, die nur innerhalb ihres röhrig aufgetriebenen und meist mehr oder weniger verzweigten Aderwerkes, Ausstülpungen der Leibeshöhle mit Tracheen und Nerven aber keine Muskeln enthalten.

Dieses Aderwerk ist durch Verdickungen im Chitin besonders dickwandig, tritt darum auch meistens besonders deutlich hervor und hat für die Systematik eine hier nicht zu behandelnde Bedeutung; die Verdickungen des Aderwerkes bewirken eine für das Flugvermögen wichtige, elastische Aussteifung der sonst dünnhäutigen und wenig widerstandsfähigen Flügelflächen; denn infolge des Muskelmangels fehlt den Insektenflügeln die Fähigkeit, den Flügelschlag und auch die eventuelle Auseinanderfaltung der etwa vorher in der Ruhelage zusammengefalteten Flügel selber mit aktiven Mitteln zu besorgen oder zu unterstützen; sie sind vielmehr hierbei allein auf die im Thorax liegenden Muskeln angewiesen, die einzig auf die kompliziert gebauten Ansatzstellen der Flügel, wie auf den Handgriff eines Fächers wirken, also von der Basis aus die Fächer auseinanderfalten und auch auf- und abschwingen müssen; dazu ist aber die Aderversteifung notwendig, um die basalwirkende Kraft auf die übrigen Flügelteile zu übertragen. Flügel, die in der Ruhelage auch quergefaltet werden, wie beispielsweise die Hinterflügel der Käfer, besitzen hierzu eine besondere Einrichtung zwischen der Vorderrandader und der ihr folgenden Diskoidalader. Indem sich bei dem Aneinanderlegen der beiden Adern, der zwischen ihnen gelegene Teil der Flügelmembran nach unten faltet, schlägt dieser gleichzeitig infolge einer eigentümlichen hebelartigen Anordnung der distalen Aderteile auch das freie Flügelende quer unter den übrigen Flügel automatisch um.

Nicht überall bewahren beide Flügelpaare ihre Flugtüchtigkeit; bei den Käfern und manchen Orthopteren werden die Vorderflügel zu pergamentartig harten Schutzdecken, Elytren, unter denen die Hinterflügel als eigentliche Flugorgane zusammengefaltet werden können; ist nur die Basis der Vorderflügel in solcher Weise stark chitinisiert, so nennt man sie „Hemielytren" (z. B. bei Heteropteren); bei vielen Insekten fehlt ein Flügelpaar und zwar meist das hintere, z. B. bei allen Dipteren, nur ausnahmsweise (beim ♂ der Strepsipteren) das vordere. Zuweilen können die Hinterflügel (bei Lepidopteren und Hymenopteren) mit Hilfe von Hakenborsten, die sich am Hinterrand der Vorderflügel anhaken können, mit den Vorderflügeln zu einer gemeinsam wirksamen Schlagfläche während des Fluges verbunden werden

2b) F l o s s e n b i l d u n g e n b e i W i r b e l l o s e n u n d U n p a a r f l o s s e n b e i F i s c h e n. Die lokomotorischen B e w e g u n g s o r g a n e d e r W i r b e l t i e r e treten in ihren niedersten Zuständen im Bereich der primitiven Fischgruppen als F l o s s e n (P i n n a e), auf. Darunter versteht man mehr oder weniger lappige oder doch stark abgeplattete Körperanhänge, die infolge von Eigenbewegung oder durch Vergrößerung der wirksamen Schlagflächen des Körpers oder auch nur als sogenannte Stabilisierungsflächen (s. unten) das Schwimmen wasserlebiger Tierformen entweder ausschließlich bewirken oder aber, sofern der übrige Körper den Hauptanstoß zur Lokomotion beibehält, das Schwimmen in irgendwelcher Weise unterstützen.

Flossen treten zwar schon im Bereich der Wirbellosen, nämlich zunächst bei den Mollusken auf — die Pteropoden haben seitliche Anhänge des Molluskenfußes, die sogenannten Parapodiallappen, die in ihren ersten Anfängen bei tektibranchiaten Opisthobranchiern vorkommen, unter Rückbildung der übrigen Fußteile zu mächtigen Ruderflossen entwickelt, die beim Schwimmen flügelähnlich auf- und abbewegt werden; bei den Heteropoden entwickelt sich vom Vorderteil des Fußes aus eine senkrechte Flossenplatte, deren wellenförmige Schwingungen die Schwimmbewegungen des übrigen Körpers unterstützen; die Cephalopoden entwickeln vielfach seitliche Ruderfalten, die den ganzen Rumpf umziehen oder auf dessen hinterstes Ende beschränkt bleiben — diese Flossen bei Mollusken haben aber keine phylogenetische Bedeutung für diejenigen der Wirbeltiere, sie sind nur ihnen analoge aber nicht homologe Bildungen. Mit der Unsicherheit der genaueren Ableitung der Wirbeltiere von den Wirbellosen fehlt auch jede einigermaßen gesicherte Anknüpfung der Wirbeltierflossen an ähnliche Bildungen der Wirbellosen, doch verdient immerhin erwähnt zu werden, daß schon im Bereich der Tunikaten der Ruderschwanz der Appendikularien, der in seinem Aufbau (Schwanzganglien rückenmarkähnlich über der Chorda gelegen) viel Wirbeltierhaftes hat, durch Flossensäume seine Wirksamkeit erhöht; diese sitzen aber seitlich, und könnten deshalb nur für die paarigen Extremitäten eine gewisse, sicherlich nur sehr fernliegende stammesgeschichtliche Bedeutung haben.

Die primitivsten Wirbeltiergruppen, der Amphioxus und die Cyclostomen, tragen nur unpaare Flossensäume in der Medianebene des Körpers; die Anlage von unpaaren Extremitäten, die ursprünglich als eine einheitliche Hautfalte hinter dem Kopfe beginnt, als ein Rückenkamm nach dem Schwanz hinläuft, diesen umgreift und bis zur Aftergegend reicht, persistiert im ganzen Bereiche der Fische, sondert sich aber fast stets in drei Teile, nämlich 1. die Rückenflosse, die selbst wieder in kleinere Flossen

zerfallen kann, 2. die Schwanzflosse und 3. ventrale Afterflosse. Da diese unpaaren Bewegungsorgane nur im Wasser dienlich sind, gehen sie schon bei den Amphibien verloren, deren Larven aber meist noch mehr oder weniger einheitliche, jedoch im Gegensatz zu den Fischen skelettlose, unpaare Flossensäume tragen.

2 c) Paarige Fischflossen, Archipterygium, pentadactyle Gliedmaßen und Vogelflügel. Fortbildungsfähig, auch für das Landleben, erweisen sich dagegen die paarigen Flossen, die dem Amphioxus und Cyklostomen noch fehlen, sonst aber bei allen Fischen vorkommen und hier als 1. Brust- oder Thoracalflossen und 2. als Abdominal- oder Ventralflossen unterschieden werden. Während das Brustflossenpaar eine sehr konstante Lagerung dicht hinter dem Kopfe durchhält, verschiebt sich die ursprüngliche Lagerung des Ventralflossenpaares vom hinteren Ende der Leibeshöhle, bei einzelnen Gruppen der Fische sehr erheblich, beispielsweise bei den Kehlflossern soweit nach vorne, daß sie vor die Brustflossen in der Kehlgegend hineinrücken; selten werden die Bauchflossen (z. B. bei den Aalen), bei den Muränen aber außerdem auch die Brustflossen zurückgebildet.

Die Befestigung der Fischflossen an dem Körper und ihre elastische Versteifung wird durch Skelettelemente bewirkt, die, soweit sie im Körperinneren und in der Basis der Flosse verlaufen, als „Flossenträger", distal hiervon aber bis zum Flossenrande hin als „Flossenstrahlen" bezeichnet werden. Bei Rücken- und Afterflossen sitzen die Flossenträger auf den Dornfortsätzen der Wirbelsäule auf; bei der Schwanzflosse fügen sich die Flossenstrahlen ohne Vermittelung von Trägern direkt den ventralen und dorsalen Dornfortsätzen des Endes der Wirbelsäule an. Die Trageapparate der paarigen Flossen, der Schultergürtel und der Beckengürtel, sind bogenförmige paarige Skelettspangen, von denen jede eine Gelenkfläche für die Extremität trägt und durch diese Gelenkfläche in einen dorsalen und ventralen Spangenteil zerlegt wird. Der dorsale Spangenteil heißt Schulterblatt oder Scapula für die vordere, Darmbein oder Ileum aber für die hintere Extremität; sie beharren unter zahlreichen Modifikationen in der ganzen Wirbeltierreihe. Der vom Gelenk aus sich abwärts hinziehende, ventrale Spangenteil, der bei den Fischen noch einheitlich zu sein pflegt, gabelt sich bei den tetrapoden Wirbeltieren (von den Amphibien an aufwärts) unter Beihilfe von Belegknochen in einen vorderen und hinteren Ast; der vordere wird beim Schultergürtel zur Clavicula, der hintere zum Coracoid, von denen jedoch einer oder beide zur Rückbildung kommen können. Die gleiche Spaltung tritt auch an dem ventralen Teil des Beckengürtels auf; er teilt sich bei den Tetrapoden in den Vorderast, das Os pubis, und den Hinterast, das Os ischii, deren Anwesenheit trotz zahlreicher Modifikationen abseits der Fische nur bei völligem Fehlen der Extremitäten (Schlangen) vermißt wird.

In ihrer Lagerung werden die Extremitätengürtel der Fische vorwiegend oder ausschließlich durch Muskeln erhalten; bei den landbewohnenden Wirbeltieren wird dagegen ein festerer Anschluß an die Wirbelsäule dadurch erreicht, daß beim Schultergürtel sich das Coracoid an das Brustbein (Sternum) anheftet, welches ja selbst wieder durch Vermittelung der Rippen mit der Wirbelsäule verbunden ist, während die Clavicula sich an einem besonderen, in seiner Bedeutung umstrittenen, dem Brustbein aufgelagerten Knochen, dem sogenannten Episternum anstützt, und so gleichfalls eine allerdings oft nur sehr lose, indirekte Verbindung mit dem Brustbein und hierdurch auch mit dem Achsenskelett erhält. Fester und unmittelbarer wird der Anschluß des Beckengürtels im dorsalen Spangengebiet durch Anlagerung des Ileums an die verstärkten Querfortsätze eines oder mehrerer Wirbel, der Kreuzbeingegend, welche Sakralwirbel heißen, bei den Tetrapoden ausgeführt, was sich leicht daraus begreift, daß den Hinterextremitäten die Hauptarbeit bei dem lokomotorischen Vorschieben des Körpers zufällt und darum ihre Leistungen auch durch feste Verbindungen möglichst ungemindert der Körperachse zugetragen werden.

Ueber die phylogenetische Herkunft der paarigen Extremitäten sind die Ansichten noch geteilt, während die „Seitenfaltentheorie" (Balfour, Rabl, Wiedersheim) einen hypothetischen, nur embryonal in manchen Fällen eben noch angedeuteten, rechts und linksseitigen Flossensaum, der seine vordersten und hintersten Strahlen zu den Skelettstücken der beiden Extremitätenpaare ausbildete und den mittleren Verbindungsteil zur Rückbildung brachte, annimmt; glaubt die „Kiemenbogentheorie" (Gegenbaur), daß die paarigen Gliedmaßen aus umgewandelten Kiemenbogen und Kiemenstrahlen hervorgegangen seien, indem die Kiemenbogen selbst zum Schulter- und Beckengürtel wurden, während von den Kiemenstrahlen einer die übrigen an Größe überholte und dabei zum Träger für seine Nachbarn wurde. Unabhängig von der Entscheidung über diese Theorien wird als die gemeinsame Urform der paarigen Extremitäten das auf die eine oder andere Weise entstandene „Archipterygium" angesehen, das noch in den Flossen gewisser niedrig stehender Fische vorkommt. (Fig. A.) Es enthält zahlreiche Skelettstücke, die in Größen und Formverhältnissen wenig verschieden, in vielen dicht aneinanderliegenden Reihen zu einem platten Ruder zusammengeschlossen sind. Unter den Reihen der Skelettstücke bildet sich eine als „Stammreihe" besonders stark aus; sie sitzt mit einem ansehnlichen Skelettstück, dem „Metapterygium" an dem Extremitätengürtel an, und trägt im typischen Falle entweder auf zwei Seiten (Archipterygium biseriale) oder nur auf einer (Archipterygium uniseriale) die übrigen Reihen als Seitenreihen. Gewöhnlich jedoch zeigen außerdem auch einige der

Seitenreihen selbständigen Anschluß an den Schultergürtel und können hier gleichfalls mit größeren Skelettplatten, die alsdann Meso- und Propterygium heißen, beginnen.

Aus dem Archipterygium läßt sich die „pentadactyle", d. h. die f ü n f f i n g e r i g e Extremität ableiten, welche als Grundform für alle höheren, vorübergehend oder dauernd das Land bewohnende, Wirbeltiere gilt. Die Umwandlung des uni- oder oder auch des biserialen Archipterygiums in die pentadactyle Gliedmaße stellt man sich folgendermaßen vor (Fig. A und B). Erstens hat eine Reduk-

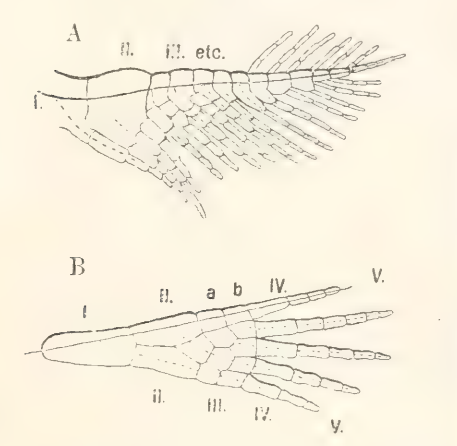


Fig. A. Rechtes Brustflossenskelett von Xenacanthus. Nach Fritsch.

Fig. B. Grundschema der pentadactylen Gliedmaße. Nach G e g e n b a u r. Die punktierten Linien geben die Seitenstrahlen an. Der Hauptstrahl ist durch eine ganze Linie gekennzeichnet.

tion der Gesamtzahl der Strahlen von zahlreicheren Strahlen aus auf einen Hauptstrahl und vier Nebenstrahlen stattgefunden. Der Hauptstrahl liefert die Knochenreihe für den fünften Finger, die Nebenstrahlen versorgen die übrigen vier Finger mit Knochenreihen. Zweitens die Skeletteile nehmen ungleichmäßigere Größen an; das Metapterygium verlängert sich säulenförmig und wird zum Oberarm (Humerus) bei der vorderen, zum Oberschenkel (Femur) bei der hinteren Extremität, (A und B I) auch das zweite Stück des Hauptstrahls sowie das erste Stück des ersten Nebenstrahls verlängern sich erheblich und werden zu den jeweils zwei Knochen des Unterarmes und Unterschenkels, also zu Ulna und Radius der Vorder- bezw. Fibula und Tibia der Hinterextremität (A und B II); klein und von würfelähnlicher Gestalt bleiben dagegen die folgenden Knöchelchen auf Haupt und Nebenreihen; sie bilden die Carpalia, Handwurzelknochen, der Vorder- und die Tarsalia (B III a, b), Fußwurzelknochen, der Hinterextremität; ihnen schließen sich dann als Metacarpalia und Metatarsalia die schlankeren Mittelhand- und Mittelfußknochen an (B, IV), denen dann als distale Enden der Extremitäten die Phalangen, nämlich die Finger oder die Zehen, folgen (B, V). Die dritte und zugleich eine der folgenreichsten Abänderungen besteht in der Ausbildung von Gelenken. Das Archipterygium war als einheitliche Ruderplatte gelenklos zusammengefügt, die Benutzung der Extremitäten als ein den Körper tragender und bewegender Hebelapparat macht eine gelenkige Verschiebbarkeit der einzelnen Skelettabschnitte notwendig. Es tritt eine Quergliederung der Extremitäten durch Gelenkbildung ein, von denen vor allen Dingen zwei an jeder Extremität besonders wichtig erscheinen, nämlich einerseits das Ellbogengelenk (zwischen Ober- und Unterarm) und das Handgelenk (zwischen den beiden Unterarmknochen und den Carpalia) an der Vorderextremität und andererseits das Kniegelenk (zwischen Ober- und Unterschenkel) und das Sprunggelenk (zwischen den beiden Unterschenkelknochen und den Tarsalia) an der Hinterextremität; dazu kommen noch für beide Extremitäten die minder wichtigen Gelenke der Phalangen. Viertens wird durch die Einführung der Gelenke eine winklige Anordnung der einzelnen Skeletteile ermöglicht.

Dieses Grundschema (B) der pentadactylen Gliedmaße kann sich nach drei Richtungen verändern. Es treten nämlich erstens, allerdings nur sehr selten, Reste eines sechsten oder gar siebten Strahls oder Fingers auf, was sich durch eine größere Zahl von Skelettstücken als dem gegebenen Schema entspricht, kund gibt; zweitens findet in sehr vielen Fällen durch Verschmelzung oder gänzliche Rückbildung von Einzelteilen eine Reduktion der Skelettstücke statt; so ist meist die Zahl der Carpalia geringer als 10, obgleich man nach dem Schema diese Anzahl erwarten sollte; es hat in solchen Fällen eine oft noch embryologisch nachweisbare Verschmelzung von Carpalien oder Tarsalien stattgefunden; oder es kommen nur 4, 3, 2 oder sogar nur 1 Zehe zur Ausbildung; die übrigen sind dann, wie mit Sicherheit angenommen werden muß und außerdem für die Pferdereihe einwandsfrei an fossilen Funden belegt werden konnte, verloren gegangen; drittens kann auch eine Verlagerung oder Rückbildung von Hauptgelenken stattfinden, so wird das Sprunggelenk der hinteren Extremität bei Reptilien und Vögeln mitten in den Tarsus hinein verlegt, so daß bei der Bewegung die Tarsalien der proximalen Reihe mit Tibia und Fibula (B und C, II u. III a), die der distalen Reihe mit den Metalarsalia (B und C III b und IV) festverbunden oder vollständig verschmolzen sind

(Intertarsalgelenk der Vögel); bei den Walen, deren Vorderextremitäten sich sekundär wieder in Flossen eigener Art umgewandelt haben, sind Hand- und Ellbogengelenke durch straffe Verbindung der Knochen funktionslos geworden u. dgl. m.

Während im allgemeinen die angegebenen Modifikationen nur innerhalb der einzelnen Ordnungen der landbewohnenden Wirbeltierklassen, namentlich der Säugetiere, eine ziemliche Konstanz, zwischen den Ordnungen aber große Verschiedenheiten zeigen, macht sich in der ganzen Klasse der Vögel eine auffallend konstante Ausbildung der beiden Extremitätenpaare geltend. Die Vogelbeine erhalten ihr eigentümliches Gepräge außer durch das Intertarsalgelenk und die Rückbildung der Fibula zu einem griffelförmigen Anhang an der Außenseite der umfangreichen Tibia (C, II) vor allem durch den auf den Unterschenkel am Fersengelenk distal folgenden Röhrenknochen, den sogenannten Lauf[1]) oder *Tarso-Metatarsus* (C IIIb + IV), der durch Verschmelzung der distalen Fußwurzelknochen (jenseits des Intertarsalgelenkes) mit den gleichfalls zusammengesinterten (bei Pinguinen frühere Trennung noch erkennbar) Mittelfußknochen entstanden ist und durch seine sehr variabele Größe die Länge der Beine vorwiegend bestimmt. Er bildet an seinem unteren Ende Gelenkrollen für die Zehen (C V 1 bis 4) aus. Die drei oder vier, nur beim afrikanischen Strauß auf zwei reduzierten Zehen bestehen aus mehreren Phalangen, deren Zahl sich von innen nach außen in der Weise steigert, daß die erste zwei, die vierte äußere Zehe aber fünf Glieder besitzt. An den Vorderextremitäten der Vögel, den *Flügeln*, behalten zwar Humerus (C 1) und die beiden Unterarmknochen, Radius und Ulna (C 2) ihre herkömmliche Gestalt, der Handteil aber, der bei den rezenten Vögeln (contra *Archaeopteryx*) nicht mehr als Körperstütze sondern nur als Träger der Handschwingen funktioniert, wird in folgender Weise stark reduziert. Die Handwurzel (C 3), die ursprünglich noch in sieben Karpalelementen angelegt ist, verschmilzt zu bloß zwei unscheinbaren Knochen, ihnen schließt sich ein komplizierter gebautes Knochenstück an, das aus drei Metakarpalien verwachsen ist, von denen das erste nur einen kurzen, am Handgelenk vorstehenden, seitlichen Anhang darstellt an den beiden größeren anderen, die ösenartig ein gemeinsames, ihre frühere Selbständigkeit anzeigendes Fenster umspannen (C 4, 4); auf dieses metakarpale Knochenstück setzen sich drei Finger an, nämlich der Daumen (C 5), nahe am Handgelenk, auf dem seitlichen Anhang, die beiden anderen z. T. miteinander verwachsenen (C 5 2 und 3) auf dem distalen Querbalken des Fensters. Von den drei Fingern besitzt der erste, nämlich der die Alula (Afterflügel) tragende, Daumen nur eine Phalange, der zweite, mittlere und größte, hat deren zwei oder drei, der dritte wiederum nur eine. — Diese Einheitlichkeit im Flügelbau der Vögel ist etwa nicht eine „Conditio sine qua non“ für das Fluggeschäft, sondern ein Anpassungsresultat an dasselbe von seiten eines langher überkommenen Erbstückes, nämlich der schon beim *Archaeopteryx* auftretenden auf drei Finger reduzierten Hand. Andere Flugtiere der Vertebraten, die mit den Vögeln nicht in einer Erbschaftslinie stehen, bauen ihre Flügel durchweg in anderer Weise auf. Bei den Flugsauriern der Jura und Kreidezeit ist der fünfte Finger ganz ungewöhnlich verlängert, und dient zur Ausspannung der Flugfläche, die sich zwischen ihm, den Rumpfseiten und der Armunterseite als Hautfalte hinzieht. Bei den Fledermäusen wird eine ähnliche Flughaut, hier „Patagium“ genannt, zwischen vier stark verlängerten Fingern, den 2. bis 5., auseinandergespannt; sie reicht bis zur Fußwurzel der Hintergliedmaßen, ja kann auch noch den Schwanz einschließen; der stark bekrallte Daumen bleibt frei und kurz.

Fig. C. Skelett eines Falken.

[1]) Bei den sogenannten Gangbeinen, die bis an die Ferse befiedert sind, ist der Lauf der erste Abschnitt der Hinterextremität, der unbefiedert ist; im Gegensatz hierzu ist bei den Watbeinen auch ein Teil der Tibia oder die ganze Tibia nackt.

Mechanik der Bewegungsorgane.

3 a) *Allgemeines.* Auf welche Weise und mit welchen Mitteln sich der Tierkörper in speziellen Fällen auch immer bewegen mag, stets verlangt die Fortbewegung des Tierkörpers in einer bestimmten Richtung, daß die bewegten und bewegenden Körperteile in dieser Richtung besonders leicht, d. h. unter besonders geringer Reibung, unter besonders geringem Widerstand von seiten des angrenzenden Außenmediums in eine

neue progressive Position vorangebracht werden können und daß dann während einer zweiten Bewegungsphase in der entgegengesetzten Richtung die Reibung der Körperteile oder der Widerstand derselben an dem angrenzenden Medium entweder dauernd oder wenigstens zeitweise besonders groß ausfällt, damit die nach ihrem Vorrücken auf den gesteigerten Widerstand treffenden Bewegungsorgane, den zu bewegenden Tierkörper um die während ihrer progressiven Phase gewonnene Strecke, nach vorne nachziehen oder auch nach vorne — unter solchen Umständen dadurch oft noch größere Strecken gewinnend — vorstoßen können. Verhältnismäßig einfach läßt sich diese Bedingung, die aber keineswegs die einzige ist, dann erfüllen, wenn sich die Bewegung auf der Grenzfläche eines dichteren und eines weniger dichten, leichtbeweglichen Mediums vollzieht, also bei den Bewegungen auf dem Boden, wobei die Bewegungsorgane durch die überstehende Luft oder das Wasser in die progressive Phase eingeführt werden und dann am festen Boden den Widerstand für die Repulsionsphase finden. Schwieriger gestaltet sich die Erfüllung der Bedingung aber beim Schwimmen und Fliegen, im einheitlichen Medium. Während auf dem festen Boden ein Abstoßen mit kleinen Auflageflächen vorteilhaft genügen kann, verlangt die Schwimm- und Flugbewegung eine Zurückstoßung des Mediums mit möglichst großer Fläche; hierbei erschwert sich demnach die Forderung dadurch, daß dasselbe Bewegungsorgan, das schmal und schneidend während der progressiven Phase vorgezogen wird, unter möglichster Flächenentfaltung während der repulsiven Phase nach hinten gestoßen werden muß.

Hier können nur allgemeinere Gesichtspunkte für die im Abschnitt 2 genannten Bewegungsorgane gegeben werden, ohne daß indes die dortige Reihenfolge auch hier streng eingehalten wird.

3b) Amöboide Bewegung. Bei der amöboiden Bewegung dient in den weitaus meisten Fällen eine kontraktive Spannung der Oberfläche als Energiequelle für die Bewegung. Diese Spannung kann zweierlei Natur sein; entweder entspricht sie der physikalischen Oberflächenspannung, die sich überall da einstellt, wo die Oberfläche einer Flüssigkeit an ein ihr ungleiches Medium anstößt; das ist bei amöboiden Zellen dann der Fall, wenn der Plasmaleib der Zelle bis an die Oberfläche hin in flüssigem Zustand verharrt, so daß alsdann die flüssige Plasmaoberfläche an das andersgeartete flüssige umgebende Wasser angrenzt; oder aber die kontraktive Spannung der Oberfläche wird bei denjenigen amöboiden Zellformen, deren Oberfläche aus dem flüssigen in den gelatinierten Zustand übertritt, wie dies bei zahlreichen Rhizopoden mit gallertigem Ektoplasma der Fall ist, durch einen kontraktiven Gelatinierungsdruck geliefert, der unter unverkennbarem Einfluß des umgebenden Wassers entsteht[1])

Wird durch irgendwelche Einflüsse, die von der Außenwelt (etwa bei chemotaktischen oder heliotaktischen Reaktionen) auf die Zelle einwirken, oder die auch durch Vorgänge im Zelleib selbst bedingt sein können, die Spannung der Oberfläche an irgendeiner Stelle der Körperoberfläche herabgemindert, so wölbt sich die betreffende Stelle nach Maßgabe der Druckverminderung über die übrige Zelloberfläche als Pseudopodium vor, weil die kontraktive Spannung der übrigen Oberfläche auf den zähflüssigen Inhalt der Zelle stärker drückt als die in ihrem Druck herabgeminderte Oberflächenstelle, so daß die inkompressible Innenmasse des Plasmatröpfchens unter dem stärkeren Druck der übrigen Oberflächenteile nach der Stelle der Spannungsverminderung entweichen muß. Aeußert sich die Spannungsverminderung längere Zeit hindurch in einer bestimmten Richtung, so kann sie, wie sich durch analoge physikalische Versuche belegen läßt, zu einer Bewegung des Plasmatröpfchens in dieser bestimmten Richtung führen; ist die Spannungserniedrigung nur vorübergehender Natur, so wird nach dem Aufhören derselben das Pseudopodium wieder eingezogen.

Schließlich existieren auch einige wenige Rhizopoden mit gelatiniertem „häutigen“ Ektoplasma, z. B. Amoeba terricola, welche ihr Ektoplasma durch lokalisierte temporäre Aufquellungsvorgänge zu allen möglichen Gestaltveränderungen und dadurch auch zu lokomotorischen Bewegungen veranlassen können.

Die Lokomotion wird im allgemeinen durch die Pseudopodien oder auch durch den gesamten Weichkörper in zwei verschiedenen Weisen vermittelt. Bei Amöben mit flüssigem Ektoplasma (z. B. Amoeba blattae) entsteht an Stelle der Erniedrigung der Oberflächenspannung ein sogenannter Ausbreitungswirbel, der in der Achse des vorfließenden Plasmateiles nach vorne verläuft und dann am äußersten Scheitel sich in zahlreiche kürzere Randströme auseinanderteilt, die wie bei einer Springfontaine in entgegengesetzter Richtung, nach hinten abfließen. Der Ausbreitungsscheitel rückt progressiv in das leicht bewegliche Wasser vor, während diejenigen der rückläufigen Randströme, welche sich an festeren Gegenständen, am Boden des Gewässers z. B.,

[1]) Vermutungsweise dadurch, daß das Wasser aus den Oberflächenschichten des Plasmas Stoffe auswäscht, welche anderwärts im Inneren des Plasmakörpers, im sogenannten Entoplasma, das Plasma als kolloidales Lösungsgemisch im Flüssigkeitszustand erhalten, bei ihrer Auswaschung an der Oberfläche aber die Gelatinierung des Ektoplasmas und zugleich durch ihre Beseitigung die Kontraktion desselben vermitteln.

reiben und ihnen adhärieren, den Weichkörper repulsiv nach vorne auf der festen Unterlage verschieben; man spricht in diesen Fällen von einer „fließenden Amöbenbewegung“; oder aber es wölben sich, bei Amöben mit gelatiniertem Ektoplasma, Pseudopodien oder beträchtlichere Mengen des Weichkörpers selbst [1]) über der vorderen Auflagekante des Rhizopodenkörpers frei (progressiv) in das umgebende Wasser hin vor und verlagern dadurch den Schwerpunkt des Weichkörpers vor die vorderste Auflagekannte, so daß die Amöbe dann mit dem neu vorgeschickten Körperteil auf die Unterlage auffällt, sich also um einige Bogengrade um die frühere vorderste Auflagekante herum, die durch ihre Reibung auf dem Boden die Repulsion zur Vorwärtsbewegung liefert, nach vorne rollt. Durch Wiederholung des Vorganges entsteht die zweite Art der Amöbenbewegung, die man als „rollende“ oder „rotierende“ bezeichnet.

3 c) F l i m m e r b e w e g u n g. Wenig Sicheres ist über das Zustandekommen der B e w e g u n g d e r F l i m m e r h a a r e bekannt; nur das Eine weiß man, daß diese Bewegung automatisch verläuft, denn vom Zellkörper losgetrennte Cilien oder Flagellen schlagen weiter. Fast allgemein wird angenommen, daß jedes Flimmerhaar aus zweierlei Substanzen nämlich aus einer aktiv kontraktilen Substanz [2]), die den wirksamen repulsiven Schlag gegen das Wasser ausführt, und einer passiven festeren Stützsubstanz besteht, die durch ihre Elastizität die Wimper nach dem Schlage wieder in ihre Ausgangsstellung zurückführt; je nach der gegenseitigen Lagerung der kontraktilen zu der passiv elastischen Substanz resultiert die Eigenart der Schlagbewegung, die sehr verschieden sein kann. Sie kann eine hakenförmige, kegelförmige, korkzieherförmig spiralische oder auch eine fortlaufende Wellenbewegung sein, und sich über das ganze Flimmerhaar oder auch nur über einzelne Teile desselben hinziehen.

[1]) Bei der Aussendung der Pseudopodien ist stets, wie auch ohne weitere Ableitung einleuchten wird, eine Verlagerung von Innenplasma an die Oberfläche, beim Einziehen der Pseudopodien aber eine Verlagerung von Oberflächenplasma in den Innenkörper hinein notwendig; der erstgenannte Vorgang, bei dem das auf die Oberfläche aufsteigende Entoplasma in zähflüssigeres Ektoplasma durch die Berührung mit dem Wasser umgeprägt wird, heißt „Ento-Ektoplasmaprozeß“, der zweite, der die Umlagerung von der Oberfläche nach dem Inneren besorgt, ein reversibler Gegenprozeß des ersten, wird „Ekto-Entoplasmaprozeß“ genannt.

[2]) Die kontraktile Substanz führt ihre Kontraktionen in meist sehr regelmäßigen Intervallen aus, kann aber trotz ihrer Automatie von äußeren Einwirkungen beeinflußt werden, vor allem pflegt sich bei Wimperzellen mit vielen Flimmerhaaren die Schlagphase jeder Wimper derjenigen ihrer Vorgängerin anzupassen, jede folgende Wimper fängt nämlich ihren Schlag um einen kleinen Zeitteil später an als ihre Vorgängerin (Metachronie des Wimperschlages); auf diese Weise entsteht ein sehr regelmäßiges Spiel der Wimpern, das dem Hin- und Herwogen eines vom Winde bestrichenen Kornfeldes gleicht.

Bei diesen verschiedenen Bewegungsweisen kann den Forderungen einer erleichterten Progressionsmöglichkeit und einer, unter gesteigertem Widerstand stattfindenden Repulsion vorzüglich durch drei Methoden genügt werden: 1. dadurch, daß die Ruder oder Ruderteile in einer Form vorwärts gebracht werden, deren Projektionsbild auf einer senkrecht zur Bewegungsrichtung gedachten Ebene möglichst klein ist, dann aber in einer Form nach hinten geführt werden, deren Projektion auf die gleiche senkrecht zur Bewegungsrichtung gedachte Ebene möglichst groß ist; 2. dadurch daß die Vorwärtsbewegung der Ruder langsamer stattfindet als die Rückwärtsbewegung, so daß bei dem rascheren Rückwärtsschlag das umgebende Medium nicht Zeit findet, dem Ruderschlag in gleicher Weise auszuweichen wie beim langsamen Vorziehen der Ruder und darum auch während des Rückwärtsschlages einen größeren Widerstand bietet; 3. dadurch daß dem Ruderhaar eine besonders geeignete immanente Eigengestaltung zukommt, ein Ruderhaar oder ein Ruderplättchen, das beispielsweise mit einer konkaven Krümmung gegen das Wasser schlägt, wird größeren Widerstand im Wasser finden, als ein solches, das mit konvexer Krümmung durch das Wasser gezogen wird u. dgl. m. Ganz das gleiche gilt auch für andere Ruderorgane also beispielsweise für die Bewegung der Ruderplättchen der Ctenophoren, für die Parapodien schwimmender Polychaeten oder für die Ruder und Schwimmfüße der Arthropoden.

So kann es manchmal schon genügen, daß in der Richtung der Vorwärtsbewegung konvex gekrümmte Cilien hin und her schlagen, um ein Vorwärtsrücken des Cilienträgers im Wasser, oder ein Rückwärtsrücken des umgebenden Mediums bei transvektorischen Bewegungen zu erzielen, weil bei der repulsiven Phase die konkave Ruderseite infolge von Wirbelbildungen stärker auf das Wasser drückt als die vordere Konvexseite bei der progressiven. Da keine dieser drei Methoden die beiden anderen ausschließt, können sie alle drei nebeneinander an dem gleichen Ruder unter eventueller Vorherrschaft irgendeiner derselben in Wirksamkeit treten.

Die Bewegungsart des Körpers als Ganzes genommen, die eine sehr verschiedenartige, bald gradlinige, bald rotierende bald hin und hertaumelnde sein kann, hängt außer von der Bewegungsart und Aufstellung der Ruder

auch von der jeweiligen Lagerung des Körperschwerpunktes zum Ansatzpunkte der Ruder und außerdem auch von der Form des Zellkörpers ab; ein Insufor mit einem spiralgedrehten Peristomeinschnitt z. B. wird leicht dadurch zur Rotation um seine Körperachse gebracht, daß sich das umgebende Wasser während der Vorwärtsbewegung des Körpers wie eine spiralgebogene Gleitschiene in das Peristom hineindrängt.

Die Flimmerbewegung ist infolge des wenig widerstandsfähigen Aufbaues der Flimmern zu größeren Kraftleistungen nicht tauglich, sie wird daher außer bei Protozoen nur bei verhältnismäßig kleinen niederen Vertretern (Mesozoen-, kleine Turbellarien und Rotatorien) und, meist in Form von Wimperschnüren, bei kleineren Larvenformen mancher höherstehenden Metazoenformen (Larven der Turbellarien, Nemertinen, von Anneliden, Gephyreen, Mollusken, Molluskoiden und Echinodermen) noch als alleiniges Lokomotorium benutzt. Die Wimperschnüre erhöhen ihre Wirksamkeit meist dadurch, daß sie an wirksamsten Stellen, beispielsweise auf dem größten Körperquerschnitt oder auf lappigen oder sonstwie gestalteten Körperhervorragungen, aufgestellt sind, oder dadurch, daß sie, wie dies bei den Echinodermenlarven am deutlichsten hervortritt in zahlreichen Faltungen, ihre Längenausdehnung dadurch vermehrend, über geeignete Körperstellen und Körperanhänge hin- und herziehen.

In weitestem Umfange erhält sich innerhalb der aufsteigenden Metazoenreihe die Flimmerbewegung nur zur Fortbewegung von Spermatozoen, von Einzelzellen also, die vermöge ihrer Organisation und ihres Berufes an sich schon auf geringer Größenentfaltung zurückgehalten werden; von größeren Tierformen wird sie nur zu transvektorischen Bewegungen verwendet, indem zu Epithelien zusammengefügte Flimmer- oder Geißelzellen in angrenzenden flüssigen Medien Wirbel und Strömungen erzeugen, welche vor allem festsitzenden oder temporär sich festheftenden Wassertieren, wie Spongien, Bryozoen, Brachiopoden oder Rotatorien, Nahrung und Atemwasser herbeistrudeln; oder welche bei Lagerung in inneren Hohlraumsystemen, zur Bewegung von exkretorischen und sekretorischen Zellerzeugnissen (in Drüsenkanälen im Darm u. dgl.) sowie auch zum Transport der Eier innerhalb der Leibeshöhle dienen. Bei Wirbeltieren kommen derartige Wimpervorrichtungen nur an sehr wenigen Körperstellen vor, bei den Arthropoden fehlen sie ganz.

3d) B e w e g u n g e n d u r c h M u s k e l n u n t e r B e i h i l f e n i c h t m u s k u l ö s e r a n t a g o n i s t i s c h e r E i n r i c h t u n g e n b e i W i r b e l l o s e n. Im gleichen Maße, wie die Ausbildung von Wimperorganen als Lokomotorium in der Metazoenreihe mit dem Größerwerden der Tiere zurücktritt, nimmt die Ausbildung kontraktiler Elemente, die bei den Myonemen der Protozoen eine nur nebensächliche oder zeitweilige Bedeutung hatten, immer mehr zu und ihre Verwendung in Form bestimmt gelagerter Muskeln wird eine immer vielseitigere. Eigentliche Muskeln fehlen nur den niedersten Metazoen, den Spongien und Dicyemiden, sonst vermögen sie überall einerseits transgrediente Veränderungen der Körperform und dadurch Körperbewegungen und andererseits auch in Körperhohlräumen transvektorische Substanzverschiebungen zu vermitteln. Die höhere Leistungsfähigkeit der Muskeln solchen Kontraktionen gegenüber, wie sie schon eine in Kontraktion befindliche amöboide Zelle zu leisten vermag, beruht darauf, daß die Kontraktion erstens nicht mehr eine vielseitige Verkürzung des Plasmakörpers wie bei der Amöbe verursacht, sondern daß diese Verkürzung in einer ganz bestimmten Richtung in der Längsrichtung des Muskels nämlich, erfolgt und durch diese Beschränkung in der spezialisierten Richtung besonders intensiv ausfällt, und zweitens darauf, daß sie viel rascher verläuft und drittens darauf, daß sie infolge größerer Zugfestigkeit des Muskelplasmas auch größere Massen zu bewegen und größere Widerstände zu überwinden vermag.

Die Strecke, um die ein Muskel sich bei der Kontraktion verkürzen kann, ist seiner Länge proportional, während die Kraft, mit der er sich zusammenzieht, mit seiner Dicke zunimmt. Spannt sich ein Muskel zwischen zwei bewegbaren Ansatzpunkten aus, die weiter voneinander entfernt liegen als die zu einer bestimmten Bewegung dieser Ansatzpunkte sich als notwendig ergebende Muskellänge, dann geht der Muskel an einem oder an beiden Enden in Sehnen über, er wird nur so lang, wie er infolge seines Kontraktionsvermögens zur Erreichung der erforderlichen Bewegung sein muß, und überträgt dann seine Bewegung mit Hilfe der strafffaserigen Sehnenbündel, die sich bei der Kontraktion durchaus passiv verhalten, auf die weiter auseinanderliegenden Ansatzpunkte.

Hört der Kontraktionsreiz auf, so verliert der Muskel mehr oder weniger rasch seine Verkürzungsspannung, er erschlafft und wird zwar durch seine eigene Elastizität wieder etwas länger, zu seiner Ausgangslänge kann er aber nur unter fremder Beihilfe, die man als antagonistische Einwirkung bezeichnet, zurückkehren.

Die antagonistische Dehnung der Muskeln wird entweder durch elastische Gegenwirkung eines anderen Organteils oder durch Turgorspannung im bewegten Teil oder sie wird bei weitem am erfolgreichsten, durch die Kontraktion anderer in entgegengesetztem Sinne wirksamer Muskeln, die man schlechthin als „Antagonisten“ bezeichnet, oder schließlich auch durch das Zusammenwirken von mehreren dieser antagonistischen Vorrichtungen bewirkt.

Durch e l a s t i s c h e W i r k u n g des Schloßbandes am Rückenschloß der Muschelschalen erhalten beispielsweise die Schließmuskeln der Muscheln ihren antagonistischen Apparat.

Die Ringmuskeln der Salpen, welche beim Schwimmen durch ihre Kontraktion das Wasser aus der hinteren Egestionsöffnung des Tonnenkörpers herausschleudern, werden durch die Elastizität des Tonnenmantels wieder gedehnt. Die elastische Wirkung der Körperkutikula, unterstützt durch den Turgor der prall mit Flüssigkeit gefüllten Leibeshöhle, bringt als antagonistische Vorrichtung den langen Leib der Spulwürmer und anderer Nematoden wieder in seine Ausgangsstellung zurück, wenn die lokalen Kontraktionen der, bei diesen Würmern allein vorhandenen, Längsmuskeln Krümmungen des Wurmkörpers verursacht haben. Zum Verständnis der Wirksamkeit eines **Hautmuskelschlauches** diene folgendes Beispiel. Der Regenwurm kriecht unter abwechselnder Verdünnung (d. h. progressiver Vorreckung) und darauf folgender Verdickung (d. h. repulsiver Abstoßbewegung gegen seine Unterlage) seiner einzelnen Körperabschnitte besonders aber der vorderen. Bei der progressiven Bewegungsphase wird die Verlängerung durch Kontraktion der Ringmuskeln dadurch bewerkstelligt, daß diese die Leibeshöhlenflüssigkeit in der Längsrichtung fortpreßt und hierbei die Längsmuskeln antagonistisch dehnt; hiernach kontrahieren sich die Längsmuskeln und dehnen nun durch die antagonistische Gegenwirkung der auf den verkürzten Schlauchteil zusammengezogenen Leibeshöhlenflüssigkeit die Ringmuskeln. Ring- und Längsmuskeln wirken daher durch Vermittelung des Turgors der Leibeshöhlenflüssigkeit antagonistisch und diese Wirkung kann zunächst lokalisiert bleiben, weil andere Körperstellen durch die Einschaltung von Scheidewänden in der Leibeshöhle sich nicht aufblähen, denn zu ihnen kann die Flüssigkeit, die von den Scheidewänden und zusammengezogenen Ringmuskeln zurückgehalten wird, nicht vordringen. Verdünnungs- und Verdickungswellen können nun aber metachron sukzessive über den ganzen Körper hinlaufen und dabei die Lokomotion besorgen. Die Strecken der jeweiligen Körperverdickung heften sich nämlich mit Hilfe der über die Körperkutikula emporragenden Borstenhaken an ihre Umgebung an, während die Strecken der Körperverdünnung durch ihre Längsreckung den Vormarsch vermitteln, und den erzielten Fortschritt dadurch festhalten, daß die anfängliche Körperverdünnung in eine Körperverdickung übergeht, sobald die betreffenden Körperstrecken von der beim Vorwärtskriechen von vorn nach hinten verlaufenden Verdickungswelle erreicht werden. Beim Rückwärtskriechen verlaufen die Wellen in umgekehrter Richtung. Sehr viel fördernder (weil mit ganzer Körperlänge gleichzeitig ausgeführt) ist die schrittweise Spannerbewegung, wie sie die Hirudineen mit ihrem Hautmuskelschlauch zu Wege bringen. Dieselbe Bewegungsart findet sich auch bei Spannerraupen und in modifizierten Formen auch sonst noch in vereinzelten Fällen. Die thorakalen und abdominalen Fußpaare dienen den Spannerraupen nur zum Festhalten an der Unterlage, sie ersetzen also gleichsam nur die Saugnäpfe des Blutegels, die Spannerschritte werden wie beim Blutegel nur vom Hautmuskelschlauch aus inszeniert. Ein Blutegel heftet sich bei jedem seiner Schritte mit seinem hinteren Saugnapf auf einer festen Unterlage an, und erhält hier den festen Widerstand, der ihm erlaubt, seinen Körper in einem Gebiet geringeren Widerstandes nämlich im überstehenden Wasser unter Längsstreckung, die durch Kontraktion der Ringmuskeln seines Hautmuskelapparates unter Mitwirkung der Turgorspannung der Leibesinnenmasse (wie beim Regenwurm) ausgeführt wird, auszudehnen; er heftet dann seinen am Vorderende aufgestellten Mundsaugnapf wiederum an den Boden an, und zieht hierauf unter Kontraktion seiner Längsmuskeln vor allem der ventral gelagerten Längsmuskeln, die seinen Leib ösenartig nach oben krümmen, den hinteren Saugnapf, der durch Loslassen vom Untergrund seinen Widerstand aufgibt, an den vorderen heran; dabei ist abermals der Widerstand in der Bewegungsrichtung, also in der Bewegung des Körpers nach dem vorderen Saugnapf hin ein denkbar geringer, denn diese Bewegung vollzieht sich im Wasser und jeder folgende Körperquerschnitt rückt in die Lücke ein, die von dem vor ihm liegenden Körperquerschnitt durch Zurückdrängen des Wassers bereits entstanden ist, so daß jeder Querschnitt nur soviel Wasser zu verdrängen braucht, als seine eventuell größere Ausdehnung dem vorausgehenden Körperquerschnitt gegenüber oder seine eventuell eingetretene geringfügige seitliche Verschiebung verlangt.

Der Turgor wirkt in vielen Fällen den Muskeln gegenüber, sozusagen, wie ein flüssig verschiebbares Gerüst, er gewährt den jeweils in Bewegung begriffenen Körperteilen während der Muskelwirkung den zur Ausführung der Bewegung notwendigen Halt; so wird z. B. der Fuß mancher Muscheln erst dadurch unter die volle Wirksamkeit seiner Muskeln gebracht, daß Blut in den Fuß hineingetrieben und in ihm durch Klappenvorrichtungen während der Aktion der Fußmuskeln zurückgehalten wird. Beim Zurückziehen des Fußes wird dann das Blut wieder in weite nachgiebige Räume des Körpers, vorzugsweise in die unter den Schalen gelegenen Mantelteile zurückgepreßt.

Einen sehr eigentümlichen Bewegungsapparat, der in vorwiegendem Grade mit Turgorspannungen arbeitet, haben die Echinodermen in ihrem sogenannten „**Ambulakralgefäßsystem**“ zur Ausbildung gebracht. Es ist dies eine Röhrenleitung, die i. d. R. durch eine siebförmig durchlöcherte Skelettplatte, die sogenannte Madreporenplatte hindurch, äußeres Meerwasser aufnehmen kann oder doch wenigstens mit einer sehr leichtbeweglichen wässerigen Flüssigkeit gefüllt ist, und von einem den Mund umziehenden Ringgefäß aus, dem radiären Körperbau der Echinodermen entsprechend, radiärgerichtete Röhren in jeweils bestimmter Zahl (fünf oder mehr) in den Körper hineinschickt; an diesen Radiargefäßen sitzen in paarigen Reihen die schlauchförmigen Ambulakralfüßchen, die durch das Hautskelett hindurchtreten und auf der Körperoberfläche nach außen hervorragen; zu jedem Ambulakralfüßchen gehört noch eine kontraktile Blase, die Ampulle, die durch muskulöse Zusammenschnürung ihrer Wand die, ihr durch die Radiarkanäle zugetragene, Flüssigkeit in die Füßchen hineinpreßt und letztere auf solche Weise zu erheblicher Länge turgeszieren kann, während die Muskulatur der Schlauchwand der Füßchen nur die Richtungen und Krümmungen des aufgetriebenen Schlauchfüßchens bestimmt und auch bei der Zurückpressung

der Flüssigkeit aus den Füßchen, antagonistisch gegen die Turgeszierung der Füßchen beteiligt ist. Beim Kriechen werden die Füßchen abwechslungsweise durch den Turgor vorgetrieben, also verlängert und dann durch Zurücktreiben der eingeströmten Flüssigkeit in die kontraktile Blase verkürzt. Bei ihrer Verlängerung können sich die Füßchen, sofern sie wie bei allen kletternden Formen ein Saugnäpfchen an ihrem Ende tragen, an dem Untergrund festheften und dann bei ihrer Verkürzung den Tierkörper hinter sich herziehen, oder sie werden auch offenbar da, wo ihnen die Endsaugnäpfe fehlen, als Stemmstangen zum Fortschieben benutzt.

In ganz anderer Weise wird das Einziehen und Ausstoßen von Wasser zur Lokomotion in den Wasserstrahlpropeller-Einrichtungen von Quallen, Salpen und manchen Cephalopoden benutzt. Das Wesentliche derartiger Einrichtungen besteht darin, daß durch energische Muskelkontraktion vorher aufgenommenes Wasser aus irgendeinem Wasserbeutel so rasch ausgespritzt wird, daß der ausgestoßene Wasserstrahl an dem umgebenden ruhenden Wasser Widerstand findet, und so einen Rückstoß ausübt, der den Wasserbeutelträger in entgegengesetzter Richtung forttreibt. Da bei dieser Bewegungsweise der Wasserbehälter stets nur langsamer oder doch wenigstens umständlicher, durch Vergrößerung seiner Oeffnung, gefüllt werden darf, wenn seine Wiederfüllung nicht wieder zu einem Rückwärtsgesaugtwerden des Trägers führen soll, so geht hieraus hervor, daß bei dieser Bewegungsweise mehr Zeit oder eine größere Umständlichkeit auf den lokomotorisch wirkungslosen Teil der Bewegungsphasen vergeudet wird als auf den lokomotorisch wirksamen Teil derselben. Diese Bewegungsweise kommt darum auch nur da vor, wo schnellere aktive Bewegungen an sich nicht praktisch oder aus besonderen Gründen technisch überhaupt nicht durchführbar sind, wie bei den zarten gelatinösen Quallen, deren Gewebefestigkeit viel zu gering ist, um einen raschen Transport in nicht gleichsinnig strömendem Wasser zu ertragen; auch für die Salpen gilt ähnliches; oder wir finden sie dann, wenn die Bewegung nur zeitweise etwa als Fluchtbewegung benutzt und dann wieder sistiert wird und zwar auch nur dann als Nebenfunktion einer Vorrichtung, die sonst der Beschaffung von Atemwasser dient; die längere Zeit der Ruhe gewährt dann eine genügende Dauer zur Wiederfüllung des Apparates, so bei den Oktopoden und den Sepien unter den Cephalopoden, welch letztere mit dem Wasserstrahl zugleich ihre „Tinte" als eine die Fluchtrichtung verdeckende Wolke aus ihrem Trichter ausstoßen.

Wenn auch bei den Oktopoden die Verwendbarkeit der Wasserrepulsion dadurch vielseitiger wird, daß sie die Ausstoßöffnung des Trichters nach verschiedenen Seiten zu wenden und dadurch recht geschickte Bewegungen nach ganz verschiedenen Richtungen auszuführen vermögen, so vermag der hier auf seiner höchsten Leistungsfähigkeit angekommene Apparat doch nur kleinere Formen, wie die jungen Eledonen, längere Zeit hindurch zu tragen; den größeren Lasten erwachsener Tiere ist er auf die Dauer auch hier nicht gewachsen. Ebenso vorübergehend sind die Repulsionsbewegungen, die gewisse Muscheln (z. B. Lima, Pecten) durch Zusammenklappen ihrer Schalen mit eventueller Zuhilfenahme von Sondervorrichtungen an ihrem Mantelrande zum Aufsuchen neuer Standorte verwenden.

3e) Weiterführende Bewegungen mit muskulösem Antagonismus. Schlängelnde und undulierende Bewegungen von Körperstamm und Flossen bei Wirbellosen und Wirbeltieren. Die Entwickelung der erfolgreichsten Bewegungsart geht in unverkennbarer Weise bei den Wirbellosen von dem Hautmuskelschlauch aus, der mit beginnender Segmentierung den Antagonismus durch Turgorspannungen immer mehr ausschaltet und ihn leistungsfähigeren Muskeln überträgt. Bei den Wirbeltieren verhält sich die, dem Hautmuskelschlauch mechanisch analoge, Rumpfmuskulatur ganz in der gleichen Weise, die elastische Wirkung der Chorda wird durch Gliederung der Wirbelsäule sehr frühzeitig beseitigt und die Bewegung durch Muskeln bewerkstelligt, die in symmetrischer Weise beiderseits der Körperachse sich als Antagonisten gegenüberzuliegen pflegen. Die anfängliche Bewegungsart ist hierbei für beide Tierreihen die durch fortschreitende (nicht stehende) Körperwellen. Diese Bewegungsart, die man für den Spezialfall, daß die Körperwellen in der Horizontalebene verlaufen, auch als „schlangenförmige" bezeichnet, wird am meisten verwendet im Wasser.

Viele Würmer, manche Mollusken, zahlreiche Insektenlarven, Cerkarien, Appendikularien, Ascidienlarven und vor allem die im Wasser lebenden Wirbeltiere benutzen Körperwellungen oder Körperschlängelungen, die den ganzen Körper oder nur bestimmte Abschnitte desselben ergreifen, zum Schwimmen; unter den landbewohnenden Wirbeltieren sind es vor allem die Schlangen und schlangenähnlichen, die sich mit derartigen Körperkrümmungen bewegen.

Die vorwärtstreibende Wirkung wird hier dadurch erzielt, daß die Wellentäler und Wellenberge der in der Körperrichtung von vorn nach hinten verlaufenden Wellen durch ihre seitlichen Vorkrümmungen eine Vergrößerung ihrer Projektionsflächen in den senkrecht zur Bewegungsrichtung stehenden Ebenen bewirken und darum bei ihrer Verschiebung von vorn nach hinten das angrenzende Medium nach hinten den Tierkörper aber, sofern das umgebende bezw. das unterliegende Medium den nötigen Widerstand bietet, in entgegengesetzter Richtung nach vorne stoßen, während der geringe Querschnitt des Körpers, zumal der Körper am Vorderende zugespitzt zu sein pflegt, leicht den vor ihm liegenden Widerstand des Wassers oder der Luft (bei Schlangen) überwindet. Auf einer polierten Glasfläche

die keinen genügenden Reibungswiderstand bietet, kommen Schlangen und Blindschleichen, trotz aller Körperkrümmungen nicht von der Stelle.

Die Wirkungsfähigkeit der Körperwellung im Wasser wächst aus selbstverständlichen Gründen mit der Höhe der Körperwellen mit der Ausdehnung der gegen das Wasser anschlagenden Körperoberfläche — daher viele Wellungsschwimmer dorsoventral abgeplattet sind, wenn sie ihre Körperwellen in der Vertikalebene (z. B. Blutegel), dagegen lateral zusammengedrückt oder mit erhöhenden medianen Flossenkämmen ausgerüstet erscheinen, wenn sie ihre Körperwellen in der Horizontalebene (z. B. Fische) verlaufen lassen; sie wächst ferner mit der Anzahl der Schlängelungswellen, die gleichzeitig über den Körper hinziehen — daher häufig große Körperlänge, die mehrere Wellen hintereinanderschalten läßt — und sie wächst außerdem mit der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Körperwellen. Je nachdem einer dieser Faktoren zur besonderen Entwickelung kommt, können andere gegen ihn zurücktreten. Der niedrige Aal braucht eine größere Wellenamplitude zur Fortbewegung als die ihm sonst ähnliche aber seitlich abgeplattete Muräne; der fliehende Fisch steigert seine Geschwindigkeit durch beschleunigten Verlauf seiner Körperwellen u. dgl. m.

Unter Umständen, namentlich dann, wenn vorstehende Körperteile eine besonders große Schlagfläche bieten, genügt es, wenn nicht der ganze Körper sondern diese Körperteile die Wellenbewegung ausüben. Bei Sepia wellt beispielsweise der die Seiten und das Hinterende des Rumpfes umziehende Flossensaum, bei Loligo jederseits eine seitliche, kürzere, aber sehr viel breitere und stärker ausschlagende Endflosse. Durch Umkehrung der Wellenrichtung können diese Cephalopoden vor- und rückwärts schwimmen. Bei den Heteropoden wird die Lokomotion vorzugsweise durch die Undulationen der Flossenplatte vermittelt, die sich am vorderen Fußteil in der Medianebene erhebt und beim Schwimmen nach oben gerichtet ist, während der schwerere Körper mit seinem Rücken nach unten hängt. Auch bei einigen, allerdings nur wenigen Fischen, bei denen sich der sonst geltenden Regel entgegen der Rumpf nicht oder nur in geringem Grade an der Vorwärtsbewegung aktiv beteiligt, findet die Ortsbewegung durch Undulationen der medianen Rücken- oder Afterflossen statt, die unter Umständen von dem Schlagen der paarigen Extremitätenflossen unterstützt werden können. Diese Schwimmmethode erfordert entweder eine ungemein rasche Flossenbewegung oder die undulierenden Flossen sind besonders groß, wie z. B. die Brustflossen der Rochen, die durch ihre Größe dem ganzen Tier ihr eigentümliches plattes Gepräge verleihen. Die Rückenflosse des Seepferdchens, das ungefähr zwei Wellen auf seiner Rückenflosse zeigt, schwingt diese Wellen in einer Frequenz von 15 bis 25mal in der Sekunde hin und her. Die Muskulatur der arbeitenden Flossen ist in solchen Fällen besonders stark entwickelt, auch sind die betreffenden Flossen stärker an das Hauptskelett angeschlossen als bei anderen Fischen.

Bei der Mehrzahl der Fische bleibt aber die Schlängelung der Hauptachse die vorwiegende Bewegungsart, wenn schon in der Regel der Rumpf nicht in seiner ganzen Erstreckung, wie bei Aalen und Muränen, schlängelt, sondern vorwiegend oder ausschließlich der hintere Teil desselben, der durch die Caudalflosse eine Vergrößerung seiner Schlagfläche erhält. Die Wellenbewegung der Körperachse verläuft stets senkrecht zur Medianebene und wird in ihrer Wirkung von der unpaaren medianen Schwanzflosse unterstützt und durch deren Gestalt modifiziert. Die Schwanzflosse wird somit für die meisten Fische zu einem hochwichtigen Bewegungsorgan.

Der Schwanz tritt in drei verschiedenen Formen auf. Er heißt diphyzerk, wenn die Chorda oder die Wirbelsäule in geradgestrecktem Verlauf an seiner Wurzel endet, und die Caudalflosse als zusammenhängender Flossensaum das Hinterende des Körpers umzieht, wie dies beim Amphioxus, bei den Petromyzonten und bei den Dipneusten der Fall ist. Man bezeichnet den Schwanz aber als heterozerk, wenn sich das Wirbelsäulenende im Schwanzgebiet nach oben biegt, der Flossensaum sich aber vorwiegend auf der ventralen Seite der in die Höhe gebogenen Schwanzwirbelsäule entfaltet; die Selachier und viele Ganoiden besitzen einen derartigen heterozerken Schwanz; die dritte bei den Knochenfischen und gewissen Ganoiden (Amia) auftretende Schwanzform ist schließlich die homozerke; es wird hier eine äußerliche Symmetrie der Flosse dadurch erreicht, daß das auch hier nach oben gebogene Ende der Wirbelsäule durch Flossenträger nach unten hin verbreitet wird und infolgedessen ein gleichmäßig gerundeter Knochenspangenfächer entsteht, auf dessem Rande sich die Flossenstrahlen ansetzen. Eine besondere Länge der obersten und untersten Flossenstrahlen den kürzeren mittleren Strahlen gegenüber verleiht der homozerken Schwanzflosse meist einen konkav ausgeschnittenen Endsaum.

Die heterozerke Schwanzflosse modifiziert die Wirkung des Schwanzausschlages derart, daß sie das Schwanzende in die Höhe zu heben, das Kopfende aber zu senken trachtet; der dorsale durch die Wirbelsäule gestützte widerstandsfähigere Flossenrand drückt nämlich das Wasser nach dem nachgiebigeren, nachgeschleppten, ventralen Flossensaum hin; das nach der Ventralseite entweichende Wasser drückt den nachschleppenden Flossensaum seitlich mehr oder weniger in die Horizontalebene hinein, in der er aber nicht verharrt, sondern die er infolge elastischen Aufbaues und von Muskelwirkungen wieder verläßt, um in der Vertikalebene seine morphologische Normalstellung zu durchlaufen; bei dem Einrücken des ventralen Flossensaumes aus der Horizontal- in die Vertikalebene entsteht ein schlagender Druck auf die unterliegende Wassermasse, der das Schwanzende in die Höhe treibt.

Durch diese Einrichtung wird das Schwimmen gegen den Boden erleichtert. Beim Geradeausschwimmen haben die horizontal ausgebreiteten Brustflossen die Gegenwirkung gegen die abwärts gerichtete Schwimmbewegung des heterozerken Schwanzes zu leisten. Unter den Reptilien besaßen die fossilen Ichthyosaurier eine heterozerke Schwanzflosse, die umgekehrt gebaut war und darum auch umgekehrt wirkte; das Ende der Wirbelsäule war nach der Ventralseite heruntergeknickt, der nachgiebigere Flossensaum saß der abgeknickten Strecke dorsal auf; das dorsal über den Flossensaum entweichende Wasser drückte den Schwanz nach unten, den Kopf zum Luftatmen nach oben.

Die beiden anderen Arten der Medianflossen, die Rücken- und Afterflosse, dienen ursprünglich zur Verbreiterung der Schlagfläche der Körperhöhe, sie werden diesem Berufe aber um so mehr entfremdet, je mehr sich die Bewegungsschlängelung nach dem Hinterende des Fisches verlagert, sie treten dann nur noch als Stabilisierungsflächen oder Gleitflächen in Wirksamkeit, d. h. als Flächen, die infolge ihrer schneidenden Vorderkante und ihrer Dünnheit ihrer Bewegung nach vorne einen kaum nennbaren Widerstand, dagegen jeder Bewegung, die den Widerstand des umgebenden Mediums gegen ihre Breitseiten antreibt, die größten Hemmnisse bieten; sie gewähren der Richtung und Lage des Fisches beim Schwimmen einen festeren Halt.

Auch die paarigen Brust- und Bauchflossen wirken in der Regel gar nicht aktiv lokomotorisch; sie finden meist nur als Höhensteuer Verwendung, um den Körper in eine steigende oder fallende Richtung einzulenken, je nachdem sie ihre Unter- oder ihre Oberseite dem Wasserswiderstand entgegenkehren; zuweilen können sie jedoch außerdem vorübergehend zu langsameren Ruderbewegungen benutzt werden (beim Goldfisch z. B.), auch an der Flossenundulationsbewegung vermögen sie sich zu beteiligen; und schließlich dienen sie bei solchen Fischen, bei denen der Schwerpunkt der Schwimmblase tiefer liegt als derjenige des Körpers, wie beispielweise bei manchen Weißfischen, zur Stabilisierung des unter solchen Verhältnissen sonst labilen Körpergleichgewichts. Diesen geringwertigen Leistungen entspricht die schwache Muskulatur und die lose Verbindung, welche die genannten Flossenarten der vorwiegend aktiven Schwanzflosse gegenüber zeigen.

Die Schlängelung findet sich bei landbewohnenden Wirbeltieren nur im Bereich fußloser Reptilien und Amphibien als alleiniges und außerdem aber noch bei kurz- oder schwachfüßigen Vertretern dieser Klassen als akzessorisches Lokomotorium; in letzterem Falle hat sie die wenig fördernde Arbeit der Extremitäten zu unterstützen. Immer ist die Schlängelung auf dem Lande auf Hilfseinrichtungen angewießen, welche ein Vorschieben des Körpers unter leicht zu bewältigender gleitender Reibung ein Widerstandfinden der rücklaufenden Körperwellen aber durch adhärierende Reibung ermöglichen.

Bei den Schlangen stellen die als „Bauchschienen" stark verbreiteten Schuppen der Ventralseite, die (unter Beihilfe einer starken Bauchmuskulatur und unter eigentümlicher Beihilfe der beweglichen, mit Kugelgelenken in der Wirbelsäule eingelenkten, sozusagen wie innere Extremitäten funktionierenden, Rippen) mit ihren nach hinten aus dem Körper scharfkantig hervorragenden Rändern aufgerichtet und wieder umgelegt werden können, den Apparat vor, der nach vorn die gleitende nach hinten die adhärierende Reibung vermittelt. Diese Bauchschienen bewegen außerdem auch gleichzeitig den Schlangenkörper durch wechselzeitiges Vorziehen der scharfen Schienenränder und nachmaliges Umlegen nach hinten wie ebensoviel Abstoßhebel in kleinen Stößen nach vorn. Die Typhlopiden besitzen diese Einrichtung, um das gleichmäßig ausgebildete Schuppenkleid des ganzen Körpers herum; sie wühlen sich durch Vorziehen und Zurücklegen der Schuppenränder wie Regenwürmer in die Erde; den Meerschlangen fehlt dagegen ein ähnlicher Apparat gänzlich, die Schuppen liegen mosaikartig ohne freie Ränder in der Haut; die Tiere schwimmen schlängelnd wie Aale.

3f) Die Hebelgliedmaßen als Bewegungsorgane bei Wirbellosen und Wirbeltieren. Die leistungsfähigsten aller Bewegungsorgane sind für das Vorankommen auf dem Lande unstreitig die Hebelgliedmaßen, die sich aber sekundär wieder dem Wasserleben oder auch dem Fluggeschäft in der Luft anpassen können. Die Hebelgliedmaßen erhalten ihre Ueberlegenheit ungegliederten Extremitäten, wie Parapodien und den paarigen Fischflossen gegenüber, die als ihre stammesgeschichtlichen Vorläufer zu gelten haben, dadurch, daß sie durch Einschiebung von Quergelenken zu einem bewegbaren Hebelwerk geworden sind, dessen einzelne Glieder in mehr oder weniger ausgeprägten Winkelstellungen zueinanderstehen, so daß die ganze Gliedmaße sehr rasch (durch die Kontraktion der innerhalb der Winkel verlaufenden Muskeln) unter Verkleinerung der Winkel in ihrer Gesamterstreckung verkürzt und mindestens ebenso rasch (durch die antagonistisch wirkenden, außerhalb der Winkel über ihre Scheitel hinwegziehenden Muskeln) unter Vergrößerung der Winkel wieder gestreckt werden kann. Die temporäre Verkürzung der Gesamterstreckung der Gliedmaße wird benutzt, um das Hebelwerk vom Boden loszuheben, die Streckung aber ist in zweierlei Hinsicht von Bedeutung, sie führt einmal die erhobene Gliedmaße innerhalb des leicht beweglichen Mediums der Luft in eine neue progressive Position ein, und sie kann außerdem auch, nachdem diese Position auf dem festen Boden erlangt ist, repulsiv gegen den Erdboden wirken und hierdurch zur Hauptvermittlerin der Vorwärtsbewegung werden. Dabei sind die Extremitäten aber nicht nur Fortbeweger sondern auch Träger des Kör-

pers; daraus wird verständlich, daß die Extremitäten unter gewöhnlichen Verhältnissen den Boden nicht gleichzeitig verlassen, sondern daß unter gegenseitiger Abwechselung eine Anzahl von ihnen das Tragegeschäft besorgt, während der Rest sich zur progressiven Bewegungsphase vom Boden erhebt; bei den sechsbeinigen Insekten z. B. heben sich drei Beine, nämlich das Vorder- und Hinterbein der einen und das Mittelbein der anderen Körperseite gleichzeitig zur progressiven Bewegungsphase vom Boden auf, während die übrigen nach dem Dreifußprinzip den Körper tragen; bei den Tetrapoden arbeiten in der Regel die diagonal gestellten Extremitäten gleichzeitig; während nämlich das linke Vorder- und das rechte Hinterbein sich erheben und vorgesetzt werden, ruht die Last des Körpers, auf dem rechten Vorder- und linken Hinterbein und vice versa. Das wechselweise Ruhen des Körpers auf zwei sich diagonal schneidenden Achsen stellt größere Anforderungen an das Balancierungsvermögen des bewegten Systems, als das Dreifußprinzip der Insekten, daher die Muskulatur bei den Tetrapoden sehr viel differenzierter sein muß als bei den Insekten.

Nur wenn die Repulsionswirkung der Extremitäten gegen den Boden erheblich größer wird als das Körpergewicht, und darum der ganze Körper von dem Boden abgeschleudert wird, wie dies beim Springen und bei rascheren Fortbewegungsarten der Fall ist, können alle vier Extremitäten zeitweise gleichzeitig vom Boden abgezogen werden; das dem Tierkörper durch die Repulsion mitgeteilte Trägheitsmoment führt dann den Tierkörper in bestimmter Orientierung, die von der jeweiligen Lage des Schwerpunktes zur Körperachse in maßgebender Weise bestimmt wird, durch die Luft und die, temporär jedes Lasttragens entbundenen, Gliedmaßen haben dann nur die Aufgabe, den Körper beim Niedersinken nach dem Erdboden hin wieder in geeigneter Stellung aufzufangen und eventuell für neue Repulsionen zu sorgen.

Das den Extremitäten zufallende Bewegungs- und Tragegeschäft ist aber bei den Tetrapoden nicht zu gleichen Anteilen auf die Vorder- und Hinterextremitäten verteilt. Die Hintergliedmaßen haben den vorwiegenden Anteil bei der Fortbewegung zu leisten, sie vor allen Dingen stemmen den Tierkörper von ihrer progressiven Position aus repulsiv nach vorne, ja sie müssen in extremen Fällen bei den Zweibeinern, bei den Vögeln und dem Menschen, die ganze Bewegungsarbeit und daneben auch noch in diesen Fällen die Tragearbeit allein verrichten; die Vordergliedmaßen aber beteiligen sich nur manchmal in größerem Umfange, so, ziehend, bei manchen Kletterbewegungen, aktiv an der eigentlichen Lokomotion, meist sind sie in dieser Beziehung ganz passiv und wirken bei dem Bewegungsvorgang nur als Lastträger. Sie sind schon durch den, oft auf längerem Halse vorragenden, also an einem mehr oder weniger langen Hebelarm ansitzenden Kopf, mehr belastet als die Hinterextremitäten und ihnen wird außerdem meist noch die Hauptarbeit beim Tragegeschäft dadurch zugeschoben, daß sie in vielen Fällen kürzer sind als die Hinterextremitäten; sie entlasten die Hinterextremitäten beim Tragen, so daß diese um so erfolgreicher ihre Kraft zur Vorwärtsbewegung verwenden können.

Diese Arbeitsteilung verschafft sich auch in Verschiedenheiten des Aufbaues der Vorder- und Hinterextremitäten, namentlich bei den Säugern, deutlichen Ausdruck. Die Last des Körpers läßt sich um so leichter tragen, je mehr die einzelnen Knochen säulenartig in einer Achse übereinanderstehen, d. h. je größer die Winkel sind, welche die einzelnen Hebelstücke miteinander bilden, denn desto mehr wird die Last der Festigkeit der Knochen überantwortet und desto weniger braucht sie durch Muskelarbeit getragen zu werden. Je schwerer das Tier desto mehr nähern sich daher die Vorderextremitäten der Säulenform. Die Hinterextremitäten dagegen reihen, sofern sie nicht trotz alledem allzu belastet bleiben, wie beim Menschen oder dem schweren Elefanten oder Nilpferdkörper u. dgl., ihre Hebelstücke vielmehr in winkligen Lagen aneinander, weil dadurch ihre Muskeln viel rascher und kräftiger zur Wirksamkeit kommen. Die Winkel, die Ober- und Unterarm einerseits, und Ober- und Unterschenkel andererseits miteinander bilden, kehren sich ihre Scheitelspitzen gegenseitig zu; hierdurch wirken beide bei ihrer Vergrößerung gemeinsam, wie eine Kniepresse, hebend auf den Körper und außerdem wird jeder gewaltsamen Verschiebung des Körpers dadurch begegnet, daß jeder Stoß von vorn durch die Hinterextremität, jeder Stoß von hinten aber durch die Vorderextremität aufgefangen und vermittels einer Verkleinerung der Winkel eventuell kompensiert werden kann. Außerdem aber sind fast durchgängig die Hinterextremitäten sowohl im Skelettbau als auch vor allen Dingen in ihrem Muskelwerk erheblich stärker entwickelt als die Vorderextremitäten, und durch den Beckengürtel zur verlustlosen Uebertragung der Fortbewegungsarbeit viel fester an das Stammgerüst angeschlossen, als die Vorderextremitäten, die nur durch indirekte Verbindungen (Sternum, Rippen) mit der Wirbelsäule in elastisch nachgiebigem Zusammenhang stehen (zum Auffangen der von den Hinterextremitäten vorgeschobenen Körperlast auf den Unebenheiten des Bodens). Von den Muskeln der Hinterextremitäten sind die Streckmuskeln für die Repulsionsleistung viel stärker entwickelt als die Beugemuskeln, die nur das Gewicht der Extremitäten selbst zu heben haben. Diese Differenzen zwischen Vorder- und Hinterextremitäten machen sich, von den besonderen (durch den aufrechten Gang und den vielseitigen Gebrauch der Arme bedingten) Verhältnissen beim Menschen abgesehen, um so mehr geltend, je mehr die Hinterextremitäten zu eigentlichen S p r u n g b e i n e n werden, wie z. B. bei Hasen, Springmäusen, Känguruhs und

auch schon bei Fröschen. Auch bei springenden Insekten (Heuschrecken, Springrüssler, Floh usw.) sind die Springbeine — fast immer das hinterste Beinpaar — durch besonderen Muskelreichtum und dadurch bedeutende Dicke und meist auch durch bedeutende Länge ausgezeichnet. Bei den Insekten können aber auch andere Bewegungsorgane zum Springen dienen, die Poduriden besitzen auf der Ventralseite des drittletzten Abdominalsegmentes einen gegabelten Anhang, den sie beim Kriechen dem Abdomen parallel anlegen, beim Springen aber um seine Anheftungsstelle herum plötzlich zurückschlagen; die Schnellkäfer stemmen einen auf der Ventralseite des Prothorax nach hinten vorspringenden Zapfen auf den Rand einer im Mesothorax befindlichen Grube auf. Der Zapfen schnellt dann plötzlich in die Grube hinein, und bewirkt dadurch ein sehr energisches Vorschnellen der zusammenstoßenden Halsschild- und Elytrenränder, das den in der Rückenlage liegenden Käfer in weitem Bogen in die Höhe wirft. Auch bei den Säugern wird gelegentlich die Sprungleistung der Hinterextremitäten durch Beihilfe anderer Körperteile unterstützt. Bei den Känguruhs und den Ratten kann der Schwanz während des Absprungs aufgeschlagen werden, bei den Katzen wird die Wirbelsäule vor dem Absprunge gekrümmt, während des Sprunges aber in die Länge geschnellt u. dgl. m.

Die Hebelgliedmaßen fördern als Bewegungsorgane ceteris paribus das Vorankommen um so mehr, je länger die Hebelstücke sind, aus denen sie sich zusammensetzen, und je kleiner die Endflächen sind, mit denen sie den Boden berühren, so übertreffen die mit schmalen zylindrischen Tarsalgliedern ausgestatteten langgestreckten Laufbeine der Laufkäfer und Schaben die Lokomotionsleistungen kürzerer, breitsohliger Insektenbeine bei weitem. Die Sumpfgänger unter den Zweihufern, Sumpfantilope, Moschusochse, Sumpfhirsch und Elch, die ihre vergrößerten Hufe stärker auseinanderspreizen, um nicht einzusinken, sind weniger rasch als die übrigen, die ihre Hufe dicht aneinanderschließen; unter den Raubtieren sind die Zehengänger rascher als die Sohlengänger.

Durch Erhebung auf die Zehen und schließlich auf die Zehenspitzen wird nicht nur die reibende Stützfläche auf dem Boden verringert, sondern auch durch Emporrichten der Fußwurzel die Anzahl der über dem Boden stehenden Hebelglieder um eins vermehrt, das ganze Hebelsystem also verlängert. In dieser Beziehung erreichen die Einhufer die zum Rennen geeignetste Anpassung.

Bei der Beschränkung der Reibungsfläche, die auch durch Reduktion der Anzahl der Zehen gefördert wird[1]), wird diese natürlich immer mehr belastet und es kommt bei den, nur mit wenigen oder gar nur mit einer Zehenspitze auftretenden, Huftieren zu besonderen Schutzbildungen der Endphalangen in Gestalt von Hornschuhen, d. h. der Hufe; ihre Analoga sind bei den übrigen tetrapoden Vertebraten entweder als Krallen und Nägel (Primaten), in andere Funktionen, als Kletterhaken, Werkzeuge zum Ergreifen und Festhalten der Beute u. dgl. eingestellt oder sie sind nur insoweit entwickelt, daß sie den, bei der Lokomotion am meisten durch Reibung beanspruchten Vorderrändern der Stützflächen eine gewisse, aber weit geringfügigere Ausfestigung verleihen.

Eine kletternde Lebensweise kann an den Enden der Bewegungsorgane auch die Aufstellung noch anderer Hilfswerkzeuge als diejenige von Krallen und Haken zur Folge haben, so vermögen Bienen, Fliegen, Laubfrösche, viele Molche und Geckonen mit Hilfe besonderer, in ihrer mechanischen Wirkungsweise noch wenig geklärter Haftapparate an senkrechten Glasscheiben emporzuklettern. Bei den betreffenden Insekten (auch bei den Wanzen) stehen zwischen den beiden Endklauen des letzten Tarsalgliedes ein oder zwei „H a f t l a p p e n“; auf glatter Unterlage werden die Klauen umgelegt und der hierdurch freigewordene Haftlappen tritt, von einem feuchten aber nicht klebenden Sekret unterstützt, die Adhäsion vermittelnd, in Wirksamkeit. Bei den mit verbreiterten Zehenenden ausgestatteten Laubfröschen und bei den Molchen wirkt die zwischen der Unterfläche der Zehen und der eventuell der glatten Kletterfläche angeschmiegten Körperunterseite, beim Aufsteigen aus dem Wasser kapillar mitgenommene Wasserschicht, an die Kletterfläche adhärierend, mit. Wie die aus querverlaufenden Hautläppchen zusammengesetzten birnförmigen Haftscheiben an den Zehenspitzen der Geckonen zur Wirksamkeit kommen, ist noch ganz unklar; eine einzige mit 10 g belastete Haftzehe, die an Schreibpapier angedrückt ist, fällt hier auch im luftverdünnten Raum nicht ab; Luftdruckverhältnisse scheinen also nicht maßgebend mitzuspielen und auch die Beihilfe von Feuchtigkeit ließ sich hierbei nicht nachweisen.

Für solche Hebelgliedmaßen, die als Ruderwerkzeuge gebraucht werden, also für die Ruder und Schwimmfüße der Arthropoden, der Amphibien, der Schildkröten, der Schwimmvögel bis hinauf zu den Pinnipediern gelten mutatis mutandis und nicht immer im gleichen Maße die gleichen Gesichtspunkte, die oben schon (cf. S. 1130) für den Ruderschlag der Wimpern Erörterung fanden; so werden beispielsweise die Schwimmfüße einer Ente unter fächerartiger Zusammenklappung ihrer Zehen mit möglichst kleiner Projektionsfläche und konvexem First progressiv durch das Wasser vorbewegt, beim Rückwärtsschlag aber wird unter Spreizung der Zehen die Projektionsfläche vergrößert und gleichzeitig durch die fächerartige Entfaltung der Schwimmhäute eine konkav gewölbte Repulsionsfläche von erheblicher Wirksamkeit geschaffen. Dieselben Forderungen gelten auch cum grano salis für alle Ruderflugbewegungen der Insekten, Vögel und Fledermäuse in der Luft;

[1]) Nicht nur bei Huftieren, sondern auch sonst; so besitzt der beste Renner unter den Vögeln, der afrikanische Strauß, nur zwei Zehen.

allerdings immer nur neben zahlreichen anderen Bedingungen, von denen die einer Einstellung von lokomotorisch passiven Gleitflächen als Steuerruder (Steuerfedern des Vogelschwanzes, Elytren der Käfer) und die einer zweckmäßigen Orientierung des fliegenden Körpers im Luftraume vermittels der, durch die Bewegung der Extremitäten und des Kopfes verschiebbaren Lagerung des Schwerpunktes als die bemerkenswertesten hervortreten. Für den sogenannten Schwebeflug, wie ihn manche Vögel neben dem Ruderflug auszuführen vermögen, kommen jedoch andere Verhältnisse in Betracht. Ebenso ist die Wirkung der Fallschirme die, wie etwa die großen Brustflossen der fliegenden Fische, die Länge eines Sprungs zu verlängern vermögen, von anderer Art; sie wirken nur als Gleitflächen, die das Absinken des Körpers durch den Widerstand ihrer Breitflächen verzögern und den Körper im verlangsamten Fallen gleichzeitig in der Richtung ihres geringsten Widerstandes nach vorne verschieben. Hierher die seitlichen Hautfalten der Fallschirmechsen (Draco, Ptychozoon), der Flugbeutler, der Flughörnchen (Pteromys u. a.) und des Flattermaki. Die Verschiebung oder Erhaltung der Schwerpunktslage des Körpers ist auch für alle übrigen Bewegungsarten von erheblicher, aber bislang noch wenig bearbeiteter Bedeutung. Man wird die betreffenden Verhältnisse für die kompliziertesten Fälle, nämlich für den Gang des Menschen und den Vogelflug, bei denen gesteigertes Interesse zu eingehenderen Studien geführt hat, in besonderen Artikeln (vgl. die Artikel „Bewegung") behandelt finden.

Literatur. **R. Hesse**, *Der Tierkörper als selbständiger Organismus, Leipzig 1910.* — **L. Rhumbler**, *Physikalische Analyse von Lebenserscheinungen der Zelle. I. Bewegung, Nahrungsaufnahme usw. bei lobosen Rhizopoden. Arch. Entwickelungsmech. VII, 1898, S. 103ff.* — **Derselbe**, *Allgemeine Zellmechanik. Ergebn. d. Anat. und Entwickelungsgesch., VIII, 1898, S. 570ff.* — **P. Jensen**, *Protoplasmabewegung. Ergebn. d. Physiol., I, 1903, S. 1ff.* — **A. Pütter**, *Flimmerbewegung. Ergebn. d. Physiol., II, 1904, S. 1ff.* — **H. S. Jennings**, *Das Verhalten der niederen Organismen. Uebersetzt von Mangold, Leipzig 1910.* — **W. Schewiakoff**, *Ursache der fortschreitenden Bewegung der Gregarinen. Zschr. f. wiss. Zool., LVIII, 1894, S. 340ff.* — **J. B. Pettigrew**, *Ortsbewegung der Tiere, Leipzig 1875.* — **E. J. Marey**, *Le mouvement, Paris 1893.* — **Derselbe**, *Les lois de la morphogénie chez les animaux. Arch. de physiol., 5e série, I.* — **Derselbe**, *Recherches sur le mécanisme du vol des Insectes. Arch. de l'Anat. et de la Physiol., VI, S. 19 und S. 349.* — **R. Pearl**. *The movements and reactions of Freshwater Planarians. Quarterly, Journ. of micr. Science, XLVI, 1902, S. 509ff.* — **B. Friedländer**, *Das Kriechen der Regenwürmer. Biolog. Zentralbl., VIII, 1888, S. 363ff.* — **W. Biedermann**, *Die lokomotorischen Wellen der Schneckensohle. Arch. f. d. ges. Physiol., CVII, S. 1ff.* — **Th. List**, *Der Bewegungsapparat der Arthropoden. I. Morphol. Jahrb., XXII, 1895, S. 380. Dasselbe, II. Mitteil. d. zool. Station Neapel, XII, 1895, S. 75.* — **R. Leuckart**, *Der Bau der Insekten in seinen Beziehungen zu den Leistungen und Lebensverhältn. dieser Tiere. Arch. Naturgesch., XVII, 1851, S. 1ff.* — **V. Graber**, *Die Insekten, München 1877.* — **Derselbe**, *Die mechanischen Werkzeuge der Tiere, Leipzig und Prag 1886.* — **J. Lubbock**, *Ursprung und Metamorphosen der Insekten. Uebersetzt von Schlösser, Jena 1876.* — **Fr. Voss**, *Ueber den Thorax von Gryllus domesticus. Zschr. f. wiss. Zool., LXXVIII, 1905, S. 268ff. und S. 645ff.* — **C. Gegenbaur**, *Vergleichende Anatomie der Wirbeltiere, Leipzig 1898 bis 1901.* — **C. Rabl**, *Gedanken und Studien über den Ursprung der Extremitäten. Zschr. f. wiss. Zool., LXX, 1901.* — **R. Wiedersheim**, *Vergleichende Anatomie der Wirbeltiere, 6. Aufl., 1906.* — **R. Hertwig**, *Lehrb. d. Zool., 9. Aufl., 1910.* — **O. Bütschli**, *Vorlesungen über vergl. Anatomie, Leipzig 1910.* — **R. Fick**, *Handbuch der Anatomie und Mechanik der Gelenke unter Berücksichtigung der bewegten Muskeln. Jena 1904—1911.* — **F. Ahlborn**, *Ueber die Bedeutung der Heterocerkie für die Ortsbewegung. Zschr. wiss. Zool., LXI, 1895, S. 1ff.* — **Derselbe**, *Der Flug der Fische. Progr. d. Realgymn. d. Johanneum zu Hamburg, 1895.* — **G. Simmermacher**, *Haftapparate bei Wirbeltieren. Zool. Garten, XXV, S. 289ff.* — **Derselbe**, *Ueber die Haftapparate an den Tarsalgliedern von Insekten. Zschr. f. wiss. Zool., XL, 1884, S. 481.* — **A. Schuberg**, *Ueber Bau und Funktion der Haftapparate des Laubfrosches. Arb. aus dem zool.-zootom. Instit. Würzburg, X, 1891.* — **F. Weitlauer**, *Eine Untersuchung über den Haftfuß des Gecko. Verhandl. d. zool. botan. Gesellsch., Wien, LII, 1902, S. 328.* — **L. Döderlein**, *Ueber die Erwerbung des Flugvermögens bei Wirbeltieren. Zool. Jahrb., Abt. f. Syst., XIV, S. 49ff.* — **H. v. Meyer**, *Das menschliche Knochengerüst, verglichen mit dem der Vierfüßler. Arch. f. Anat. und Physiol., Anat. Abt., 1891, S. 292ff.* — **O. Fischer**, *Physiologische Mechanik. Enzyklopädie d. mathemat. Wissensch., IV, 1, II, S. 62ff.* — **Derselbe**, *Der menschliche Körper vom Standpunkt der Kinematik aus. Arch. f. Anat. u. Physiol., Anat. Abt., 1893, S. 180.* — **J. Wimmer**, *Mechanik der Entwickelung der tierischen Lebewesen, Leipzig 1905 (handelt vorzugsweise von Extremitätenmechanik).*

L. Rhumbler.

Beyrich

Heinrich Ernst.

Er wurde am 31. August 1815 in Berlin geboren, besuchte das Gymnasium zum grauen Kloster, das er, erst 16 Jahre alt, mit dem Reifezeugnis verließ, um sich dem Studium der Naturwissenschaften zu widmen. Er studierte in Berlin und Bonn, promovierte 1837 in Berlin mit einer Arbeit über die Versteinerungen des rheinischen Ueber-

gangsgebirges, in der er eine Einteilung der Goniatiten gab und wurde dann Assistent am dortigen Mineralogischen Museum. 1838 bis 1840 unternahm er eine Studienreise nach dem Schweizer Jura, Südfrankreich und Italien; 1841 habilitierte er sich in Berlin, arbeitete seit 1842 für die geologische Landesaufnahme in Schlesien, seit 1862 in der Provinz Sachsen. Auf seine Befürwortung beschloß die Regierung die Herstellung der geologischen Spezialkarte Preußens im Maßstab 1: 25 000. Als Lehrer entfaltete er eine segensreiche Tätigkeit, und eine große Zahl von bedeutenden Geologen zählt sich zu seinen Schülern. 1856 wurde er außerordentlicher, 1865 ordentlicher Professor der Geologie und Paläontologie. Nach Errichtung der Geologischen Landesanstalt im Jahre 1873 wurde er mit Hauchecorne wissenschaftlicher Direktor derselben. Große Verdienste erwarb er sich um die Deutsche Geologische Gesellschaft, die auf seine Anregung hin im Jahre 1848 gegründet wurde, und der er zuerst als Schriftführer und später als Vorstand angehörte. Der internationale Geologenkongreß in Bologna übertrug ihm in Gemeinschaft mit Hauchecorne und Beyschlag die Leitung der Arbeiten für eine internationale geologische Karte Europas im Maßstab 1: 1 500 000. Nach fast sechzigjähriger wissenschaftlicher Tätigkeit starb er am 9. Juli 1896 in Berlin.

Ein ausführliches Verzeichnis seiner Schriften findet sich im Jahrb. d. k. preuß. geol. Landesanstalt Berlin 1896 Bd. 17 S. CXXXII bis CXXXVIII. Hier seien nur erwähnt: 1837 Beiträge zur Kenntnis der Versteinerungen des Rheinischen Uebergangsgebirges (Berlin); 1846 Untersuchungen über Trilobiten; 1853 bis 1857 Die Conchylien des norddeutschen Tertiär (Zeitschr. d. deutsch. geol. Gesellschaft); 1857 Die krinoiden des Muschelkalks; 1860 Ueber Semnopithecus pentelicus; 1865 Ueber eine Kohlenkalkfauna von Timor; 1867 Ueber einige Cephalopoden aus dem Muschelkalk der Alpen (Abh. der Berl. Akad.).

Literatur. *Nekrolog auf E. Beyrich, Jahrb. d. k. preuß. geol. Landesanstalt, Berlin 1896, Bd. 17, S. C. II.*

O. Marschall.

Bezold

Wilhelm von.

Geboren am 21. Juni 1837 in München; gestorben am 17. Februar 1907 in Berlin. Er studierte in München und Göttingen Mathematik und Physik, habilitierte sich 1861 in München und wurde 1868 Professor an der dortigen technischen Hochschule, 1885 wurde er nach Berlin berufen als Direktor des neu zu organisierenden meteorologischen Instituts. Er arbeitete über Lichtenbergsche Figuren und elektrische Entladungen, auf dem Gebiet der physiologischen Optik und der Thermodynamik der Atmosphäre.

Literatur. *G. Hellmann, Wilhelm von B., Met. Z., S. 24, S.-A. 1907.*

E. Drude.

Bjerknes

Charles Antoine.

Geboren in Christiania am 24. Oktober 1825; gestorben im Mai 1903. Er war Ingenieur bei den Minen von Kronberg, wurde 1855 nach Paris geschickt, wo er zwei Jahre blieb, 1863 Professor an der Universität Christiania, dann an der Ingenieurschule. Seine hydrodynamischen Arbeiten wurden mit dem Ehrendiplom der elektrischen Ausstellung in Paris gekrönt.

Literatur. *C. H. Bryan, Nature 68, S. 1[illegible], 1903. — V. Bjerknes, Phys. Rev. 17, S. 125 bis 126, 1903.*

E. Drude.

Bifurkation.

Die flußabwärts gerichtete Gabelung eines Flußtales. Der eine Arm der Gabelung liegt zumeist trocken, ist also vom Flusse verlassen (siehe den Artikel „Flüsse").

Biologie.

Biologische Wissenschaften.

1. Besonderheiten der Biologie gegenüber anderen Naturwissenschaften. 2. Einteilung der Biologie. 3. Biologische Wissenschaften.

1. Besonderheiten der Biologie gegenüber anderen Naturwissenschaften. Die Biologie ist die Gesamtwissenschaft von den Lebewesen oder Organismen. Ihr Gegenstand sind „die verschiedenen Formen und Erscheinungen des Lebens, die Bedingungen und Gesetze, unter welchen dieser Zustand stattfindet, und die Ursachen, wodurch derselbe bewirkt wird" (Treviranus). Wenn die Mineralogie, die man früher mit Botanik und Zoologie oft zu einer Trias beschreibender Naturwissenschaften zusammenfaßte, nichts anderes ist als angewandte Chemie und Physik, so liegt die Frage nahe, ob es nicht bei jenen beiden ebenso ist, oder ob die Biologie eine Sonderstellung unter den Naturwissenschaften beanspruchen darf, ob sie eine selbständige Grundwissenschaft ist.

Die Bezeichnung „Biologie" wird in sehr verschiedenem Sinne gebraucht. Ihre Anwendung auf die gesamte Wissenschaft vom Lebendigen geht auf Treviranus (1802) zurück, dem u. a. Häckel, Spencer, Driesch, Tschulok darin gefolgt sind. Sehr oft wird das Wort für ein beschränktes Gebiet der Lebenswissenschaft, die Oekologie, und speziell für die Betrachtung der Lebensweise angewendet, z. B. Insektenbiologie. Besonders bei den Franzosen ist Biologie meist gleichbedeutend mit Physiologie, im englischen Sprachgebrauch wird es häufig auf Abstammungslehre und Selektionstheorie beschränkt.

Zunächst ist der Chemismus der Lebewesen ein besonderer. Ihr Körper besteht zum weitaus überwiegenden Teil aus

Verbindungen des Kohlenstoffs. Solche kommen zwar auch in der leblosen Natur vor. Aber soweit wir sie jetzt auf der Oberfläche der Erde und in den äußersten Schichten der Erdrinde finden, sind sie wahrscheinlich alle durch frühere Lebewesen hindurchgegangen und stammen von ihnen her als Abscheidungsprodukte, die diese während ihres Lebens geliefert haben oder als Umwandlungsprodukte ihres Körpers nach ihrem Tode: der kohlensaure Kalk unserer Kalkgebirge stammt von den Kalkschalen und Kalkskeletten von Tieren, z. B. von Foraminiferen (Kreide, Korallen, Muscheln u. a., sowie von Kalkalgen; aus Pflanzenleichen hat sich Torf, Braunkohle, Steinkohle gebildet; den Zersetzungsprozessen toter Organismen entstammen Erdöl, Erdwachs, die Fette bituminöser Schiefer, ebenso wie das Sumpfgas und andere gasförmige Kohlenstoffverbindungen. Selbst die Kohlensäure kohlensaurer Quellen, die dem Innern der Erde entströmen, ist in letzter Linie vielleicht auf Freiwerden von Kohlensäure aus dem Kalkgebirge zurückzuführen. Ja es ist die Frage, ob es außer den kohlenstoffhaltigen Exhalationen der Vulkane jetzt überhaupt noch Kohlenstoffverbindungen auf der Erde gibt, die nicht durch Lebewesen hindurchgegangen sind. Zwar hat die Kunst des Menschen noch zahlreiche neue Kohlenstoffverbindungen aufgebaut, die in der freien Natur nicht vorkommen; aber sie sind auch nur entstanden unter Benutzung des Kohlenstoffs, der aus Lebewesen stammt. Die Gesetzmäßigkeiten, nach denen die Kohlenstoffverbindungen reagieren, sind zwar keine anderen, als wir sie bei den übrigen chemischen Elementen und Verbindungen beobachten. Immerhin bleibt aber die Beschränkung der Kohlenstoffverbindungen auf Lebewesen eine Besonderheit, durch die die Lebewesen gekennzeichnet sind.

Während der Dauer ihres Lebens sind die Organismen vor allen anderen Naturkörpern gekennzeichnet durch den Stoffwechsel. Die lebendige Kraft, die in Gestalt der Lebensäußerungen als Bewegung im weitesten Sinne (Kontraktion, Nervenerregung, Stofftransport, Wachstumserscheinungen, Wärme, Licht, Elektrizität) zutage tritt, wird durch Stoffzerfall gewonnen; chemische Verbindungen von komplizierter Zusammensetzung, die eine große gebundene Energie enthalten, werden in einfacher zusammengesetzte Verbindungen von geringer latenter Energie zerlegt unter Freiwerden von Energie. Die Stoffe, die so zerfallen, sind z. T. allerdings nur Vorratsstoffe des Organismus; z. T. aber sind es jene eigenartigen Stoffe, die im „Protoplasma" enthalten sind und an deren Zusammenwirken das Leben stets gebunden ist. Der Zerfall des Protoplasmas macht Lebensenergie frei; „nur das Vergängliche ist lebend" (Lotze). Damit sich aber unter solchen Umständen das Protoplasma nicht ganz aufzehre zur Lieferung von Energie, muß mit dem Zerfall ein stetiger Aufbau neuen Protoplasmas Hand in Hand gehen, und dieser ist an das Protoplasma selbst gebunden; wir kennen aus der Erfahrung keinerlei Aufbau von lebender Substanz, der nicht von dieser selbst ausginge: alles Lebendige stammt von Lebendigem ab (omne vivum ex vivo). Das wird als Kontinuität des Lebens bezeichnet. Damit ist eine scharfe Abgrenzung gegen das Gebiet des Anorganischen gegeben; ein allmählicher Uebergang zwischen Leblosem und Lebendigem besteht nicht.

Die Vorgänge, die zum Aufbau lebendiger Substanz aus unbelebter führen, werden als Assimilation bezeichnet. Was durch Assimilation in letzter Linie entsteht, das Protoplasma, ist keine chemische Verbindung, sondern ist in komplizierter Weise durch Zusammenordnung von solchen aufgebaut, derart, daß diese Verbindungen unter sich und mit anderen in Wechselwirkung treten können; das Protoplasma besitzt also eine Struktur, es ist organisiert. Die dem Protoplasmaaufbau vorangehenden Geschehnisse, der Aufbau von höheren Kohlenstoffverbindungen aus Kohlensäure, Wasser und Salzen, wie sie sich in den grünen Pflanzenteilen unter dem Einfluß der lebendigen Energie des Sonnenlichtes abspielen, werden vielleicht einmal unserer tieferen Einsicht zugänglich sein und können dann wohl auch experimentell nachgeahmt werden; sie bezeichnet man als Assimilation im engeren Sinne. Assimilation nennt man aber auch die Kombination von höheren Kohlenstoffverbindungen, speziell Eiweißkörpern, zu Protoplasma, wie sie in den Zellen des Pflanzen- und Tierkörpers vor sich geht; hier entsteht nicht schlechthin Protoplasma, sondern jeweils das Protoplasma von der dem betreffenden Lebewesen eigenen Struktur, also Rosenprotoplasma, Bandwurmprotoplasma, Menschenprotoplasma. Es mag in der nichtbelebten Natur Vorgänge derart geben, daß ein chemisch charakterisierter Körper bestimmte gleichbeschaffene Verbindungen aus der Umgebung anziehen und so an Masse zunehmen kann, z. B. ein Kristall aus einer ihn umgebenden Lösung; aber Assimilation in dem Sinne, wie er eben präzisiert wurde, als Aufbau bestimmt struierter, organisierter Stoffe, ist nur den Lebewesen eigen. Hier liegt ein Problem, dessen Lösung um so schwieriger erscheinen muß, als die Erkenntnis der Strukturverhältnisse des Protoplasmas noch in den ersten Anfängen steht. Mit der Lösung des Assimilationsproblems wäre wahrscheinlich auch die Lösung für das Problem des Wachstums und

der Vererbung gegeben. Welche chemisch-physikalischen Vorgänge der Assimilation zugrunde liegen, ist im einzelnen nicht bekannt; bevor hier nicht weitere Aufklärung geschafft ist, läßt sich auch nichts Bestimmtes darüber sagen, ob wir es hier lediglich mit einem sehr komplizierten chemisch-physikalischen Problem zu tun haben. Jedenfalls aber ist dieses Problem der Vermehrungsfähigkeit der lebenden Substanz für die Biologie charakteristisch gegenüber den anderen Naturwissenschaften.

Die Struktur der organisierten Körper ist derartig, daß der Ablauf der Funktionen an ihnen in einer Weise erfolgt, die man als „zweckmäßig“ bezeichnen kann, d. h. daß alles harmonisch zusammenwirkt zum Zustandekommen eines bestimmten, gleichsam gewollten Endergebnisses; das gilt von der Struktur des Protoplasmas an bis zu der der höchstentwickelten Pflanzen und Tiere. Die „Zweckmäßigkeit“ zeigt sich besonders auffällig an solchen Beispielen, wo nach einer Störung des Aufbaus sich die Integrität und Funktionsfähigkeit der gestörten Organisation aus sich selbst wiederherstellt, also in den Fällen von Regulationen, zu denen beispielsweise die Regeneration verlorener Körperteile (etwa des abgeschnittenen Vorderendes bei einem Regenwurm) gehört. Ob für die Erklärung solcher Vorgänge, die den Stempel der „Zweckmäßigkeit“ tragen, die Gesetze der anorganischen Wissenschaft ausreichen, oder ob hier eine besondere Gesetzmäßigkeit vorliegt, die in der Physik und Chemie fehlt und der organisierten Welt allein zukommt, das ist eine Frage, die verschieden beantwortet wird. Es ist der alte Gegensatz zwischen Mechanismus und Vitalismus (vgl. den Artikel „Physiologie“), der hier wieder lebendig wird. Darwin glaubte die Existenz des „Zweckmäßigen“ durch seine Selektionstheorie erklären zu können, d. h. durch das Ueberleben des Passendsten im Kampfe ums Dasein. Die Entstehung zweckmäßiger Einrichtungen wird damit freilich nicht erklärt, sondern nur die Erhaltung derselben, wenn sie entstanden waren; aber es ist überaus wahrscheinlich, daß unter den zahlreichen Abänderungen, die an Lebewesen auftreten, auch „zweckmäßige“, für das betreffende Wesen erhaltungsmäßige vorkommen, und diese bieten ihren Trägern Vorteile und bewirken ihr Ueberleben im Kampfe ums Dasein. So müssen am Beginn der Entstehung des Lebens unter unendlich vielen Stoffkombinationen auch solche aufgetreten sein, die erhaltungsmäßig waren, bestehen blieben und die Grundlage für die Entwickelung des Protoplasmas bildeten. Nun ist zuzugeben, daß gerade gegenüber den oben erwähnten komplizierten Beispielen „zweckmäßigen“ Funktionierens die Selektionstheorie einen besonders schwierigen Stand hat; sie ist durchaus Hypothese geblieben und bedarf dringend der experimentellen Begründung, womit in neuerer Zeit vereinzelt wenigstens begonnen wird. Die Neovitalisten aber knüpfen ihre Betrachtungen gerade an solche besonders komplizierte Fälle, und Driesch glaubt den bindenden Beweis liefern zu können, daß hier die Gesetze der anorganischen Wissenschaft in keiner Kombination zur Bewältigung der Erklärungsschwierigkeiten ausreichen. Es werden daher neue Momente zur Erklärung eingeführt; G. Wolff spricht von „primärer Zweckmäßigkeit“, die dem Protoplasma innewohnt, und Driesch erklärt die „Zweckmäßigkeit“ durch die Autonomie oder Eigengesetzlichkeit lebender Körper, für die er das Wort „Entelechie“ verwendet; er versteht darunter ein elementares Naturagens, dessen wesentliche Kennzeichen wohl mit den Worten „primäres Wissen und Wollen“ bezeichnet werden können. Die „Beweise“ für die Autonomie der Lebensvorgänge sind aber noch weit davon entfernt, allgemeine Anerkennung gefunden zu haben. Die Annahme einer besonderen, der nicht organisierten Welt fehlenden Gesetzmäßigkeit bedeutet einen Verzicht auf die Erklärung der Lebensvorgänge, wie sie bisher verstanden wurde, d. h. auf die Subsummierung derselben unter die in der übrigen Natur erkannten Gesetze. Wer eine erstmalige Entstehung des Organischen und der einfachsten Organismen durch Urzeugung aus anorganischen Verbindungen annimmt — und dies ist eine Hypothese, die durch den Entwickelungsgedanken unmittelbar an die Hand gegeben wird — der wird sich nicht mit einer besonderen, die Welt der Organismen beherrschenden Gesetzmäßigkeit abfinden können, die ja mit den ersten Organismen auch erstmals zur Geltung gekommen sein müßte. Daher sind auch die Neovitalisten oft Gegner der Abstammungslehre oder gestehen ihr nur eine ganz nebensächliche Bedeutung zu. Mit der vitalistischen Annahme einer immanenten „Zweckmäßigkeit“ aber vertragen sich die Fälle von Unzweckmäßigkeiten nicht, die gerade dort auftreten, wo Lebewesen teilweise aus dem Kampfe ums Dasein ausgeschaltet werden: sie verlieren dann ihre Dauerfähigkeit für das freie Leben in weitgehendem Maße, wie es besonders der Seidenspinner, die Rassen des Goldfisches (Schleierschwanz, Teleskopfisch, Eierfisch) und manche Haustierrassen aufs deutlichste zeigen. Es kann also von einer gesetzmäßigen Zweckmäßigkeit, ich möchte sagen von einem inneren Zwang zur Zweckmäßigkeit, keine Rede sein. Das Vorhandensein einer besonderen Gesetzlichkeit für Lebewesen würde

zwar die Kluft zwischen der Biologie und den anorganischen Wissenschaften noch vergrößern. Aber auch ohne dies hört sie nicht auf, eine selbständige Wissenschaft zu sein; denn die Besonderheit der stofflichen Grundlage der Lebewesen und deren Vermehrung durch Assimilation, die Wandlungsfähigkeit ihrer Form, die „Zweckmäßigkeit" in ihren Verrichtungen werden stets der Biologie eine wohlumschriebene Sonderstellung bewahren.

2. Einteilung der Biologie. Gegenstand der Biologie sind die Lebewesen, die Pflanzen und die Tiere, und zwar sowohl die jetzt lebenden, wie die „versteinerten" Reste der ausgestorbenen Organismen, und alle diese in sämtlichen Zuständen ihre Entwickelung, vom Keim durch die verschiedensten Formwandlungen hindurch bis zur Fortpflanzungsfähigkeit und zum Absterben.

Die Gesamtwissenschaft der Biologie wird in eine Anzahl von Einzelwissenschaften eingeteilt. Wir dürfen der Einteilung aber nicht etwa die Verschiedenartigkeit der Lebewesen zugrunde legen und somit Botanik, Zoologie, Paläontologie unterscheiden, und dann weitere Unterabteilungen machen wie z. B. Protistenkunde, Mykologie, Entomologie, Ornithologie, Anthropologie. Das sind Gebiete, deren Absonderung lediglich der praktischen Betätigung in der Untersuchung kleinerer Gruppen der Lebewelt entspringt. Auf jedes dieser Fächer wird eine wissenschaftliche Einteilung der Biologie ihrerseits wieder Anwendung finden. Eine solche wissenschaftliche Einteilung entspringt vielmehr der Methodik der Untersuchung und verbürgt zugleich eine Vollständigkeit der Gesichtspunkte, die für die Betrachtung der Lebewesen maßgebend sind. Eine solche Einteilung zu geben haben sich viele Forscher bemüht, so in bahnbrechender Weise Häckel in seiner generellen Morphologie, ferner u. a. Spencer, Driesch, R. Burckhardt und neuerdings Tschulok, der zugleich eine gute Uebersicht der bisherigen Versuche bringt. Wenn auch die Einzelwissenschaften, zu denen sie kommen, im ganzen die gleichen sind, so weichen sie doch in den Einteilungsprinzipien mannigfach voneinander ab. Auch die hier gegebene Einteilung geht in vielen Punkten ihre besonderen Wege.

Als hauptsächlichster Unterschied bei der Betrachtung der Lebewesen erscheint es uns, ob der gesonderte Einzelorganismus mit Rücksicht auf seinen Aufbau und seinen Betrieb untersucht wird, ohne seine Lebensbeziehungen zur Umwelt zu erörtern, oder ob das Lebewesen in Wechselwirkung mit der Umwelt, als Glied des Naturganzen, betrachtet wird. Jene erste Betrachtungsweise stellt für die verschiedenen Lebewesen den Typus für Bau und Verrichtung der Organe fest, sie führt in die Kenntnis der verschiedenen Lebensmaschinen nach Konstruktion und Zusammenwirken der Bestandteile ein; in vergleichender Betrachtung vermag sie die Lebewesen nach ihrer Aehnlichkeit in bestimmte Gruppen zu ordnen und aus den so gewonnenen Ergebnissen eine Reihe interessanter Folgerungen zu ziehen. Es sind die beiden großen Zweige, die Morphologie und die Physiologie, von denen die eine den Bauplan, die andere die Funktionsweise der Einzelorganismen betrachtet. Sie sind wohlabgegrenzte Einzelwissenschaften, sowohl nach Stoff, wie nach Arbeitsweise; aber trotzdem ist ihre völlige Trennung methodologisch nicht gerechtfertigt. Sie betrachten die gleichen Gebilde von zwei verschiedenen Seiten, und die Ergebnisse beider ergänzen sich zu einem einheitlichen Ganzen, ja sie bedürfen eine der anderen zur vollständigen Verarbeitung ihrer Ergebnisse. Denn die Betrachtung des Baues wird nur unter Berücksichtigung der Funktion fruchtbar, und zum vollen Verständnis der Funktion muß der Bau der Teile bekannt sein: so kann die Morphologie die Beziehungen zwischen den Formen der einzelnen Körperteile, zwischen Skelett und Muskulatur oder zwischen Gebiß und Darmkanal nicht ergründen ohne Zuhilfenahme der Physiologie, und diese wird die Funktionsweise des Auges nicht verstehen können, ohne dessen Bau vorher zu kennen. Ganz besonders gilt dies für die chemische Betrachtung: die Betrachtung des chemischen Aufbaus, der in das Gebiet der Morphologie gehört, und der chemischen Vorgänge, welche Sache der Physiologie sind, ist kaum zu trennen.

Indem die Morphologie den Aufbau der Pflanzen und Tiere betrachtet, geht sie zunächst analytisch vor. Die Analyse des Organismus der Lebewesen ist sowohl eine mechanische als auch eine chemische. Die mechanische morphologische Analyse wird als Anatomie bezeichnet. Innerhalb derselben hat man wiederum eine Anzahl von Unterabteilungen geschieden, je nachdem die Untersuchung des Bauplans nur die gröbere Zusammensetzung des Körpers berücksichtigt oder auch auf die feineren Bauverhältnisse Rücksicht nimmt. Die mechanische Analyse zerfällt somit in Organologie, die Betrachtung der Organe, Histologie, die Betrachtung der Gewebe und Cytologie, die Betrachtung der allen Lebewesen gemeinsamen geformten Elemente, der Zellen, zu der natürlich auch die Anatomie der einzelligen Lebewesen, der Protisten, gehört. Diese Einteilung ist durchaus äußerlich und die Abteilungen sind nicht Sonderwissenschaften, sondern entspringen lediglich dem praktischen Bedürfnis nach Arbeitsteilung und gehen in-

einander über. Die chemische Analyse des Körpers der Lebewesen bildet einen Teil der Biochemie.

Synthetisch stellt die Morphologie zunächst die Zusammengehörigkeit einzelner Erscheinungsformen der Lebewesen zu zusammenhängenden Entwickelungskreisen fest, im einfachsten Falle also der Formen vom Ei bis zum fertigen Individuum, unter Umständen mit Umwegen über abweichend gestaltete Larvenformen, in komplizierteren Fällen die Zusammengehörigkeit von ganzen Zeugungskreisen, die mehrere Generationen „fertiger" Individuen umfassen, wie etwa von verschiedenen, voneinander abstammenden Jahreszeitenformen oder von geflügelten und ungeflügelten Generationen einer Blattlaus, oder den Zusammenhang von Polyp und Meduse. So geschieht die genaue Feststellung aller der Formen, die zu dem Bereich einer Art gehören. Dieser Zweig der synthetischen Morphologie heißt K e i m e s g e s c h i c h t e oder O n t o g e n i e. Bei weitergehender Synthese, d. i. bei Vergleichung verschiedener Pflanzen- oder Tierarten untereinander, zeigen sich die Aehnlichkeiten und Verschiedenheiten in den einzelnen Bauplänen und geben die Grundlage für die Zusammenordnung der A r t e n auf Grund des verschiedenen Betrags der Aehnlichkeiten zu Gattungen, Familien, Ordnungen, Klassen, Kreisen und Reichen, also zur K l a s s i f i k a t i o n. Das möglichst vollkommene System der Lebewesen ist also ein Ergebnis jener Betrachtungsweise, die man als v e r g l e i c h e n d e A n a t o m i e zu bezeichnen pflegt. Natürlich müssen auch die ausgestorbenen Lebewesen, soweit wir Reste von ihnen kennen, in dieses System eingeordnet werden. Auf Grund einer anderen, nicht biologischen Wissenschaft, der Geologie, ist aber für diese Reste eine bestimmte Zeitfolge ermittelt. Die von dem doppelten Gesichtspunkt der Bauähnlichkeit und der chronologischen Folge geleitete systematische Anordnung führt dann zu der Erkenntnis allmählicher Umwandlung der Lebewelt in aufeinanderfolgenden geologischen Epochen und zur Ueberzeugung von der Verwandtschaft der ausgestorbenen und jetzt lebenden Pflanzen und Tiere und der Abstammung der jetzigen Lebewesen von anders gestalteten Vorfahren. Die Abstammungslehre (Deszendenztheorie), die solches aussagt, ist also einfach eine Folgerung aus der vergleichend anatomischen Untersuchung und der daraus entspringenden Zusammenordnung der Lebewesen. Sie würde direkt bewiesen sein, wenn uns von allen ausgestorbenen Lebewesen Reste erhalten wären. Die geologische Ueberlieferung ist aber überaus lückenhaft; die weitere Erforschung der geologischen Urkunde kann zwar noch manches zutage fördern; aber da viele Organismen so beschaffen sind, daß versteinerte Reste von ihnen nicht zu erwarten sind, so ist keine Aussicht, daß wir jemals diesen direkten Beweis für die Abstammungslehre bekommen werden. Deshalb müssen indirekte Beweise, Indizienbeweise herangezogen werden; sie werden dadurch geliefert, daß sich für gewisse, sonst nicht erklärliche Verhältnisse der Anatomie, Biochemie, Ontogenie und Chorologie (Lehre von der geographischen Verbreitung der Lebewesen) einleuchtende und einfache Erklärungen nur dann ergeben, wenn die Aussagen der Abstammungslehre auf sie angewendet werden. Durch die Abstammungslehre wird auf die Anordnung der Lebewesen im System ein neues Licht geworfen: systematische Zusammengehörigkeit bedeutet zugleich Stammesverwandtschaft, das natürliche System der Organismen wird zum Stammbaum. Die Abstammung der Lebewesen und die Begründung der Herkunft der Lebewesen ist Gegenstand eines besonderen Wissenschaftszweiges, der P h y l o g e n i e.

Die P h y s i o l o g i e betrachtet zunächst analytisch die Funktionen der Lebewesen und ihrer Teile. Der früher fast ausschließlich betriebenen Organ- und Gewebephysiologie hat sich neuerdings die Zellphysiologie als gleichberechtigtes Glied der Physiologie zugesellt; sie stehen in ebenso engen Beziehungen zueinander wie die Organologie und Histologie zur Cytologie. An jedem ihrer Objekte betrachtet die Physiologie wiederum die Vorgänge des Stoffwechsels, des Kraftwechsels und der Formbildung. Die Stoffwechselphysiologie erforscht die Mittel und Wege, wodurch die als Nahrung aufgenommenen Stoffe dem Körper einverleibt und zu Bestandteilen desselben verarbeitet werden, und wodurch sie andererseits zerfallen und die Reststoffe aus dem Körper herausbefördert werden. Chemische und mechanische Analyse gehen dabei Hand in Hand; die chemischen Umwandlungen der Verbindungen beim Stoffwechsel sind Gegenstand der Biochemie. In das Gebiet der Stoffwechselphysiologie gehört u. a. das grundlegende Problem der Assimilation, wie es oben in seiner Bedeutung gekennzeichnet ist. Die Physiologie des Kraftwechsels behandelt die Schicksale der beim Stoffzerfall im Körper frei werdenden Energie bei Pflanzen und Tieren, also die eigentlichen Bewegungserscheinungen (amöboide, Flimmer- und Muskelbewegung) und die Wachstumsbewegungen, ferner Nervenleitung, Erzeugung von Licht (bei Bakterien, Tiefseetieren), Wärme und Elektrizität (elektrische Fische). Hierher gehört als Abschnitt der Lehre von den nervösen Funktionen auch die Psychologie der Tiere und damit auch

des Menschen, aber freilich nur die objektiv beobachtende, nicht die introspektive, die eigenen Bewußtseins- und Willensvorgänge des Subjekts zergliedernde Psychologie. Schließlich analysiert die Physiologie der Formbildung die Bedingungen und Ursachen für die Formgestaltung bei den Lebewesen; sie arbeitet dabei hauptsächlich mit den embryonalen Entwickelungsstufen, aber auch die verschiedenen Restitutionsvorgänge nach Störungen des Aufbaus sind sehr wichtige Objekte dieser Wissenschaft. Sie scheidet dabei den Anteil, den vorgebildete Anlagen an der Formbildung haben, von dem Anteil, der Einflüssen anderer Art, wie der Zusammenordnung der Teile, den chemischen Reizungen u. dgl. zukommt. Hierher gehört also auch der physiologische Teil der Vererbungslehre. Es ist dies jener Zweig der Physiologie, der erst in den letzten Jahrzehnten des vorigen Jahrhunderts durch Wilhelm Roux begründet und durch ihn und seine zahlreichen Mitarbeiter in bewunderungswürdiger Weise gefördert ist, die sogenannte Entwickelungsmechanik oder Entwickelungsphysiologie. Es gilt für sie ebenso wie für die anderen Zweige der Physiologie, daß sie nur Hand in Hand mit gleichzeitiger morphologischer Untersuchung reife und fruchtbare Ergebnisse zeitigen kann.

Aber wie wir eine synthetische Morphologie kennen lernten, so ist auch eine synthetische Physiologie möglich; sie ist nur bisher sehr wenig gepflegt. Erst neuerdings hat sich die Tätigkeit der Physiologen auf niedere Pflanzen und Tiere ausgedehnt, und die Physiologie der Entwickelungsstufen der Lebewesen ist fast noch gar nicht in Angriff genommen. So kommt es, daß von einer vergleichenden Physiologie, die uns die zunehmende Komplikation der Funktionen beim Aufsteigen in den Reihen der Organismen vorführt, nur die Anfänge vorhanden sind, und daß von der Entstehung und Umbildung der Funktionen innerhalb des Entwickelungskreises einzelner Lebewesen kaum etwas bekannt ist. Die nur von morphologischen Gesichtspunkten aus erschlossenen Probleme der Arbeitsteilung, des Funktionswechsels und der Substitution z. B. werden durch physiologische Studien weitere Aufklärung finden können. Wir könnten diesen Abschnitt der synthetischen Physiologie als Ergogenie bezeichnen. Ferner gehört zur synthetischen Physiologie die Betrachtung der Beziehungen zwischen Form und Funktion der Organe, der sogenannten physiologischen Korrelationen; ein sehr wichtiges Ergebnis ist hier schon gezeitigt in der Lehre von der funktionellen Anpassung. Diese Zweigwissenschaft mag als Syzygiologie („Zusammenhangslehre") bezeichnet werden. Eine Umbildung der Funktionen in der Geschichte der Lebewelt, eine physiologische Parallele zur morphologischen Phylogenie, ist nur in ganz beschränktem Maße möglich mit Hilfe der Korrelationslehre, soweit sich aus den versteinerten Resten Schlüsse auf deren Funktion ziehen lassen, so z. B. aus der Gestaltung der Schwanzflosse bei den aufeinander folgenden Formen der Ichthyosaurus-Reihe oder der Zahnformen in der Reihe der Pferdevorfahren. Die Ergebnisse werden sich ergänzend denen der Ergogenie anschließen.

Der Betrachtung der Einzelorganismen nach Bau und Verrichtung, wie sie durch Morphologie und Physiologie geübt wird, steht die Betrachtung der Organismen in ihren Beziehungen zur Umwelt gegenüber. Häckel hat dafür das treffliche Wort Oekologie geprägt. Er faßt allerdings die Oekologie mit der Chorologie, die hier als Abschnitt der Oekologie behandelt wird, unter der Bezeichnung Perilogie zusammen. Hier ist also Oekologie synonym mit Häkkels Perilogie. Es ergibt sich dabei ganz ungezwungen die Unterscheidung von Beziehungen zur leblosen und solchen zur lebenden Umwelt (nicht der anorganischen und organischen, sondern der nichtorganisierten und organisierten Umwelt). Die ersteren sind der experimentellen Erforschung leichter zugänglich, und durch die Tätigkeit zahlreicher Forscher sind uns gar manche exakten Ergebnisse über die Veränderungen der Lebewesen unter solchen veränderten Existenzbedingungen bekannt geworden. Hierher gehören die Einflüsse des umgebenden Mediums (Wasser- und Luftorganismen, Meeres- und Süßwasserbewohner u. a.), des Untergrundes, des Klimas und seiner Faktoren, wie Temperatur mit ihren Schwankungen, Sonnenbestrahlung, Luftbewegung und Luftdruck, Feuchtigkeitsgehalt der Luft, Regenmenge u. a., die Einflüsse von Schwerkraft, Licht und Dunkelheit und ihrem Wechsel, die Einflüsse der Nahrung und die Anpassungen nach Form und Lebensweise, mit denen die Lebewesen diese Einflüsse beantworten. Die lebende Umwelt bietet kompliziertere Verhältnisse und die wirksamen Faktoren bei den gegenseitigen Beeinflussungen sind hier viel schwieriger zu erkennen und auseinanderzuhalten. Die Gegenstände, die hierher gehören, sind die Beziehungen zwischen Lebewesen gleicher Art, wie Balzgewohnheiten, Brutpflege, Staatenleben und Konkurrenz zwischen Artgenossen, und andererseits die Beziehungen zwischen Lebewesen verschiedener Art, wie Wettbewerb und die daraus sich ergebenden Anpassungen (u. a. Schutzfärbung, Mimikry), Genossenschaftsleben oder Symbiose (z. B. zwischen Pilzen und Algen in den Flechten, zwischen Einsiedlerkrebs und Aktinie, zwischen Blumen und Insekten),

der Parasitismus in seinen verschiedenen Formen, und in den Wirkungen damit vielfach verwandt, die Domestikation von Pflanzen und Tieren durch den Menschen, und schließlich, all das umfassend, die Lebensgemeinschaften oder Biocoenosen, d. h. die Gesamtbeziehungen der am gleichen Orte nebeneinander vorkommenden Lebewesen. Der Oekologie gehören demnach zum Teil jene Fragen an, die sich im Gefolge der Abstammungslehre ergeben, nach den Wegen und Mitteln für die Umbildung der Organismen, der Variation unter äußeren Einflüssen und der Auslese durch den Kampf ums Dasein, während die ebenfalls sehr wichtigen Fragen nach der Vererbung und nach der Variation aus inneren Ursachen ins Gebiet der Physiologie zu stellen sind. — Einen besonderen Abschnitt der Oekologie bildet die geographische Verbreitung der Lebewesen (Pflanzen- und Tiergeographie), die *Chorologie*. Sie hat es nicht etwa bloß mit der Aufstellung von Floren- und Faunenverzeichnissen zu tun; das sind nur Vorarbeiten, allerdings sehr wichtige. Chorologie ist Oekologie in Verbindung mit Geographie; sie muß die Verteilung der Lebewesen aus zwei Gesichtspunkten zu erklären suchen, einmal aus der heutigen und früheren Gestaltung der Erdoberfläche in Verteilung von Land und Wasser, Gebirgen und Wüsten, wozu ihr Geographie und Geologie die Unterlagen liefern, und dann aus den Bedingungen der gesamten Umwelt an der jeweils untersuchten Oertlichkeit. Aus dem Wechsel dieser Bedingungen in der Zeit findet dann auch der zeitliche Wechsel in der Bewohnerschaft eines Erdabschnittes seine Erklärung, wie das z. B. für Mitteleuropa in bezug auf die Diluvialperiode mit dem Wechsel von Eis-, Steppen- und Waldzeit vorbildlich durchgeführt ist.

Wir stellen zum Schluß die Einteilung, zu der wir gelangt sind, noch einmal übersichtlich zusammen:

Biologie
Gesamtwissenschaft von den Lebewesen

Betrachtung der Einzelorganismen		Betrachtung der Lebewesen
nach Bau: *Morphologie* 1. *analytische Morphologie* a) mechanische Analyse = *Anatomie* Organologie, Organlehre Histologie, Gewebelehre Cytologie, Zellenlehre b) chemische Analyse: *Biochemie* ex parte. 2. *synthetische Morphologie* Ontogenie, Keimesgeschichte vergl. Anat. führt zu { Klassifikation Phylogenie, Stammesgeschichte.	nach Verrichtung: *Physiologie* 1. *analytische Physiologie* Organph. / Gewebephys. / Zellphys. { Ph. d. Stoffwechsels / Ph. d. Kraftwechsels / Ph. d. Formbildung 2. *synthetische Physiologie* Ergogenie = Genese der Funktion in der Einzelentwickelung und in der Organismenreihe. Syzygiologie = Lehre von den Beziehungen zwischen Funktion und Form.	in Beziehung zur Umwelt: *Oekologie* a) Lebewesen und unbelebte Umwelt b) Lebewesen und belebte Umwelt Ein besonderer Ausschnitt der Oekologie unter geographisch-geologischen Gesichtspunkten ist die Chorologie, die Lehre von der geographischen Verbreitung der Lebewesen.

3. Biologische Wissenschaften. Die biologischen Einzel- oder Teilwissenschaften, wie sie sich als Fächer für Studium und Forschung, als Gegenstände für Vorlesungen und Lehrbücher innerhalb der Gesamtwissenschaft der Biologie gesondert haben, nehmen zum ganzen eine verschiedene Stellung ein. Sie sollen hier kurz gekennzeichnet werden, soweit sie in der vorstehenden Einteilung der Biologie nicht schon genannt sind.

Zunächst sind ja jene Wissenschaften zu nennen, die nicht alle, sondern nur einen Teil der Lebewesen betrachten; ihre Sonderung entspricht der Arbeitsteilung, da es dem einzelnen nur in seltenen Fällen möglich ist, das ganze Gebiet der Biologie zu umfassen. So haben wir zunächst *Botanik* und *Zoologie*, Pflanzen- und Tierkunde und, wenn man *Häckels* Zwischenreich der Protisten gelten lassen will, dazu noch die *Protistenkunde*. Diese zerfallen in genau die gleichen Abteilungen wie die Gesamtbiologie; innerhalb der Zoologie z. B. wäre also Morphologie der Tiere (mit Anatomie, Ontogenie und vergleichender Anatomie), Physiologie der Tiere (analytische und synthetische) und Oekologie der Tiere (mit Tiergeographie) zu unterscheiden. Dasselbe gilt für die beschränkteren, nach demselben Prinzip abgegrenzten Teilwissenschaften, wie beispielsweise Lichenologie (Flechtenkunde), Bakteriologie (Bakterienkunde), Malakozoologie (Weichtierkunde), Ichthyologie (Fischkunde) und viele andere.

Unter diesen ist die A n t h r o p o l o g i e, die Menschenkunde, bei dem bedeutenden Interesse des Gegenstandes ihrer Forschung, besonders eingehend behandelt, und es sind von ihr einige Zweige abgegliedert, die Pathologie und die Hygiene, die unten noch eingehend betrachtet werden sollen. Nicht zu den biologischen Wissenschaften gehört dagegen die philosophische Anthropologie, die Psychologie der Philosophen, die auf Grund der Selbstbeobachtung das Seelenleben, d. h. die Bewußtseins- und Willensvorgänge, analysiert. Auch für die Anthropologie gilt im einzelnen dieselbe Einteilung wie für die Biologie, in Morphologie und Physiologie einerseits und Oekologie andererseits, wobei der synthetischen Morphologie des Menschen speziell die Feststellung der Rassenunterschiede, die Klassifikation der Menschenrassen und die Stammesgeschichte des Menschen zufällt, während die Oekologie die Anpassung der Menschen an die verschiedenen Wohngebiete, ihre Sitten und Gebräuche und ihre geographische Verbreitung behandelt. Wie sehr die „Völkerpsychologie", die ebenfalls hierher, nicht zur Physiologie zu stellen wäre, auf der Grenze von Biologie und Philosophie steht, das zeigt die transzendentale Auffassung, die sie vielfach findet.

Aus praktischen Rücksichten haben bestimmte Gebiete der Anthropologie eine besonders gründliche Behandlung gefunden und sind ihrem Umfange und Inhalt nach zu besonderen Wissenschaftszweigen geworden, das sind die Pathologie und im Anschluß daran die Pharmakologie, und die Hygiene. Wenn wir sie hier der Anthropologie anschließen, so geschieht das ihrer Geschichte und ihrem tatsächlichen Inhalt nach; es wäre ebensowohl auch eine Pathologie und Hygiene der Pflanzen und der Tiere im allgemeinen möglich, wie solche ja auch für Kulturpflanzen und Haustiere teilweise ausgebildet sind.

Die P a t h o l o g i e betrachtet diejenigen Abweichungen vom normalen Zustand und Funktionsablauf, welche die Lebensfähigkeit des Menschen beeinträchtigen, welche seiner Gesundheit schädlich, d. h. krankhaft sind. Solche Abweichungen können wiederum unter morphologische, physiologische und ökologische Gesichtspunkte fallen. So haben wir eine pathologische Anatomie, welche die krankhaften Veränderungen der Organe und Gewebe, die Mißbildungen, Wachstumshemmungen, Wucherungen und Neubildungen untersucht; die pathologische Physiologie betrachtet das fehlerhafte Funktionieren der Organe und Gewebe, z. B. von Herz oder Nieren und ihre Abnutzung, wie sie z. B. in Gestalt von Alterserscheinungen auftritt, die Abänderungen des Stoff- und Kraftwechsels unter dem Einfluß gewisser Stoffe, z. B. der Muskelarbeit bei Ablagerung von harnsauren Salzen, der Atmung bei Aufnahme von Kohlenoxyd, Giftwirkungen u. dgl. und sucht durch Experimente die Entstehungsursachen krankhafter Zustände zu erforschen; ökologische Betrachtungen sind es, die sich mit dem Einfluß von Parasiten (z. B. Infektionskrankheiten; daher die Bakteriologie eine wichtige Hilfswissenschaft der Pathologie), mit der Einwirkung extremer Temperaturen, mit der Anpassung an Giftstoffe und der Reaktion gegen dieselben durch Bildung von Antikörpern beschäftigen. Die Therapie erforscht die Mittel und Wege, um die durch anormale Bedingungen gesetzten Schädigungen der Lebensfähigkeit zu beseitigen. Sie läßt sich nicht als besondere Teilwissenschaft von der Pathologie abtrennen, sondern geht beständig Hand in Hand mit ihr. So kann man die Pathologie in ihrer Gesamtheit geradezu als d i e medizinische Wissenschaft bezeichnen. Die verschiedenen Zweige der Medizin sind Abschnitte der Pathologie, wie sie sich durch Arbeitsteilung nach den Organen des Menschen (z. B. Ophthalmologie = Augenheilkunde, Laryngologie = Kehlkopfheilkunde) oder nach den angewandten Methoden (Chirurgie, Orthopädie) ergeben.

Der Pathologie steht die P h a r m a k o l o g i e nahe; sie ist ein Teil der experimentellen Pathologie und untersucht die Einwirkung verschiedener Stoffe auf den tierischen Organismus, mit dem Endziel, solche Stoffe bei Behandlung von Krankheiten des Menschen (und der Haustiere) zu verwenden, teils direkt als Heilmittel zur Ausgleichung abnormer Funktionszustände, teils als Hilfsmittel bei sonstigen Eingriffen.

Selbständig neben der Pathologie steht die H y g i e n e. Sie untersucht, wie das Verhalten des Menschen (Beanspruchung der Organe, Geschlechtsleben u. dgl.) einerseits und die äußeren Verhältnisse (Nahrung, Atemluft, Temperatur, Luftdruck) andererseits beschaffen sein müssen, um der Lebensfähigkeit, der Gesundheit des Menschen förderlich zu sein und auf welche Weise sich Schädigungen vermeiden lassen durch Normierung der Lebensweise, Auswahl der Nahrung, Verhinderung von parasitären Infektionen und Einrichtung des menschlichen Haushalts (Kleidung, Wohnung, Heizung, Beleuchtung). Sie wäre also als eine physiologische und ökologische Wissenschaft zu bezeichnen. Sie kann ihre Untersuchungen wiederum spezialisieren auf bestimmte Organe (z. B. Hautpflege, Hygiene des Auges) oder auf bestimmte Lebensverhältnisse (Gewerbehygiene, Tropenhygiene).

Schließlich ist noch die P a l ä o n t o l o -

g i e zu betrachten. Ihrer Geschichte nach ist sie der Geologie entsprungen und wird auch meist im Zusammenhang mit dieser und als ihre Hilfswissenschaft betrieben. Die Vergleichung der versteinerten Tier- und Pflanzenreste ermöglicht die Identifizierung der an verschiedenen Orten vorhandenen Schichten der Erdrinde und solche Versteinerungen, die wegen ihres auf gewisse Schichten beschränkten Vorkommens für jenen Zweck besonders geeignet sind, genießen als „Leitfossilien“ das besondere Interesse der Geologen. Aus dieser gleichsam dienenden Stellung konnte die Paläontologie durch Verbindung mit der Wissenschaft von den lebenden Organismen, Botanik und Zoologie, herauswachsen. Wie auf diese, so läßt sich auch auf die Paläontologie die oben gegebene Einteilung der Biologie anwenden; die Morphologie tritt dabei stark hervor; die Physiologie dagegen ist sehr beschränkt, da Lebensäußerungen nur noch mittelbar aus den Bauverhältnissen erschlossen, nicht unmittelbar beobachtet werden können. Dagegen ist der ökologische Teil der Paläontologie von größter Wichtigkeit: das gemeinsame Vorkommen gewisser Pflanzen- und Tierformen gestattet durch Vergleich mit den Biocönosen der jetzigen Lebewelt Rückschlüsse auf die Lebensbedingungen, unter denen sie existierten und ermöglicht die Unterscheidung verschiedener Lebensgebiete oder Facies; so kann man Tief- und Flachseeablagerungen, Küstenbildungen, Süßwasserablagerungen u. a. unterscheiden. Auch die Art der Nahrung (Fleisch- und Pflanzenfresser) und die Anpassungen an die Umgebung sind vielfach aus den erhaltenen Resten abzulesen (Anpassung an das Wasserleben bei Luftatmern z. B. Ichthyosaurus). Die paläontologische Chorologie ist für das Verständnis der heutigen Pflanzen- und Tierverbreitung von großer Wichtigkeit.

Literatur. ***Rudolf Burckhardt****, Zur Geschichte der biologischen Systematik. Verh. d. Naturforsch. Ges. in Basel Bd. 16 1903 S. 388 bis 440* — ***Hans Driesch****, Der Vitalismus als Geschichte und als Lehre. Leipzig 1905.* — ***Derselbe****, Die Biologie als selbständige Grundwissenschaft. 2. Aufl. Leipzig 1910.* — ***Ernst Häckel****, Generelle Morphologie der Organismen. 1. Bd. Berlin 1866.* — ***Derselbe****, Ueber Entwickelung und Aufgabe der Zoologie (1869). Gesammelte populäre Vorträge. 2. Heft. Bonn 1879.* — ***Herbert Spencer****, Die Prinzipien der Biologie. Deutsch von B. Vetter. Stuttgart 1876.* — ***S. Tschulok****, Das System der Biologie in Forschung und Lehre. Jena 1910.*

R. Hesse.

Biot

Jean Baptiste.

Geboren am 21. April 1775 in Paris; gestorben daselbst am 3. Februar 1862. Er besuchte die polytechnische Schule in Paris, diente bei der Artillerie, studierte dann Mathematik und Naturwissenschaften, wurde Professor der Physik in Beauvais und 1800 am Collège de France in Paris, 1803 Mitglied des Instituts von Frankreich und 1809 Professor der Astronomie an der Fakultät der Wissenschaften. Er begleitete G a y - L u s s a c auf seiner ersten Luftfahrt. 1804 bis 1806 ging er zum Zweck der Gradmessung mit A r a g o nach Spanien, 1817 nach Schottland und den Orkneyinseln, 1818 nach Dünkirchen, 1824 bis 1825 nach Spanien und Italien. Seine Untersuchungen erstrecken sich über die meisten Gebiete der Physik. Mit A r a g o führte er die genaueste Messung der Schwerkraft aus. Seine mit S a v a r t angestellten Untersuchungen der Ablenkung der Magnetnadel durch den elektrischen Strom führten zu dem B i o t - S a v a r t schen Grundgesetz des Elektromagnetismus.

Literatur. ***Lefort****, Documents relatifs à la vie et aux travaux scientifiques de B., Paris 1862.* — ***Jaubert****, Notice sur B., Paris 1862.*

E. Drude.

Bischof

Carl Gustav Christoph.

Geboren am 18. Januar 1792 zu Wörth bei Nürnberg; gestorben am 29. November 1870 zu Bonn. Sein Vater, K a r l A u g u s t L e b e r e c h t, Rektor der Armen- und Waisenschule zu Fürth, zeichnete sich als naturwissenschaftlicher Schriftsteller aus (vgl. E r s c h und G r u b e r Allg. Enz. d. W. u. K. 10 257). Den ersten Unterricht erhielt B i s c h o f in Nürnberg. 1810 bezog er die Universität Erlangen, promovierte und wurde dort 1815 Privatdozent für Chemie und Physik. Nach gemeinsamen Arbeiten mit G o l d f u ß (Zoologie und Mineralogie) und N e e s v. E s e n b e c k (Naturgeschichte) wurde er 1819 mit den Genannten an die neugegründete Universität Bonn als a. o. Professor für Chemie und Technologie berufen. Dort begann er die Rheinlande und ihre vulkanischen Erscheinungen zu studieren und ward, vor allem durch das klassische Werk „Wärmelehre des Innern unseres Erdkörpers“ ein Hauptvertreter der vulkanistischen Anschauung, der er gleichzeitig damit die fast unbestrittene Alleinherrschaft verschaffte. Im Verlauf seiner weiteren Arbeiten lernte B i s c h o f die Notwendigkeit kennen, alle geologischen Erscheinungen auf bekannte chemisch-physikalische und mechanische Gesetze zurückzuführen. Seine Beobachtungen über die Wirkung und Beteiligung des Wassers bei vielen geologischen Vorgängen machten aus dem überzeugten Plutonisten bald einen übereifrigen Neptunisten. Die neugewonnenen Anschauungen legte B i s c h o f in seinem Hauptwerk, dem „Lehrbuch der chemischen und physikalischen Geologie“ nieder. Er wurde damit der Begründer einer neuen chemischen Richtung in der Geologie. Nachdem er infolge seiner Augenschwäche die letzten Lebensjahre den Verkehr

mit der Wissenschaft nur schwer hatte aufrecht erhalten können, setzte ein Schlaganfall seinem Leben ein plötzliches Ziel.

Seine wesentlichen Schriften (ausführliches Verzeichnis bei Poggendorff 1 201 und 3 I 134) sind: 1817 Physikalische und statistische Beschreibung des Fichtelgebirges (mit Goldfuß 2 Bde.); 1819 Lehrbuch der Stöchiometrie; 1824 Die vulkanischen Mineralquellen Deutschlands und Frankreichs; 1837 Wärmelehre des Innern unseres Erdkörpers; 1842 und 1843 Populäre Vorlesungen über naturwissenschaftliche Gegenstände; 1848 und 1849 Populäre Briefe an eine gebildete Dame über die gesamten Gebiete der Naturwissenschaft (2 Bde.); 1848 bis 1854 Lehrbuch der chemischen und physikalischen Geologie; 1863 bis 1866 dessen 2. Aufl. (als Fortsetzung oder Ergänzung zu betrachten); 1867 Die Gestalt der Erde und der Meeresfläche, und die Erosion des Meeresbodens.

Literatur. *Nekrolog in den Verhandl. d. niederrhein. Vereins 1870, I. Heft.* — **Cotta**, *Geologie der Gegenwart 1866, S. 347 bis 372.* — *Allgem. Deutsche Biographie 1875, 2, 665.*

K. Spangenberg.

Bischoff
Gottlieb Wilhelm.

Botaniker. Er wurde 1797 zu Dürkheim a. d. Hardt geboren. Er besuchte zunächst seit 1819 die Akademie der Künste zu München, siedelte aber 1821 nach Erlangen hauptsächlich zum Studium der Botanik über. 1823 war er vorübergehend im Geschäft seines Vaters tätig und wurde darauf, 1824, Lehrer in Heidelberg, wo er sich im folgenden Jahre für Botanik habilitierte. Im Jahre 1833 wurde er daselbst außerordentlicher, 1839 ordentlicher Professor. Er starb am 11. September 1854. Unter seinen Arbeiten sind die über Gefäßkryptogamen, Lebermoose und Characeen die verdienstvollsten: De plantarum praesertim cryptogamicarum transitu et analogia Commentatio (Heidelberg 1825), Die kryptogamischen Gewächse der Flora Deutschlands usw. 2 Lieferungen. Chareen, Equiseteen, Rhizocarpen und Lycopodeen (Nürnberg 1828), De Hepaticis imprimis tribuum Marchanticarum et Ricciearum Commentatio (Heidelberg 1835). Auch sein Wörterbuch der beschreibenden Botanik (Stuttgart 1829), sowie das Handbuch der botanischen Terminologie und Systemkunde (Nürnberg 1833 bis 1844 3 Bände) verdienen genannt zu werden.

W. Ruhland.

Bitumina.

1. Begriffsbestimmung und Uebersicht über natürlich vorkommende Bitumina und ähnliche aus diesen oder anderen organischen Rohstoffen gewonnene bituminöse Stoffe. Der Begriff Bitumen ist schwer scharf abzugrenzen, er leitet sich von „pix tumens" (aufwallendes Pech) ab und umfaßt in engerem Sinne nur den von erdigen Verunreinigungen befreiten in Schwefelkohlenstoff löslichen Naturasphalt; er ist später auch in der Technik und Literatur auf die zu Bauzwecken usw. dienenden Surrogate des Naturasphalts d. h. die durch Destillation von Erdöl, Steinkohlenteer usw. erhaltenen, dem Asphalt ähnlichen Rückstände (Petroleumpech, Steinkohlenteerpech usw.) ausgedehnt worden, wobei allerdings die in Benzol oder Schwefelkohlenstoff unlöslichen kohlenstoffreichen Bestandteile des Steinkohlenteerpechs und ähnlicher Stoffe z. B. Oelgasteerpech technisch nicht als Bitumen gelten. Im weiteren Sinne werden aber noch als Bitumen auch die übrigen, sich in der Natur findenden, hauptsächlich aus Kohlenwasserstoffen bestehenden, gasförmigen, flüssigen und festen Kohlenwasserstoffe und verseifbaren Stoffe (Erdgas, Erdöl, Ozokerit, Montanwachs) bezeichnet und endlich in noch weiterem Sinne die als Ersatz oder zum Verschnitt für die Naturprodukte dienenden durch Destillation von Kohlen, Fetten, Torf, Schiefer usw. erhaltenen vielfach geringwertigeren Kohlenwasserstofföle und deren z. T. schon oben erwähnte Destillationsrückstände (s. nachfolgendes Tableau). Die Bezeichnung Bitumen wird aber auch im Literatur- und Handelsgebrauch Produkten gegeben, wie z. B. den organischen Resten des bituminösen Schiefers, welche erst bei der trockenen oder Wasserdampfdestillation Kohlenwasserstofföle geben, das Bitumen aber nicht in einer in Benzol oder Schwefelkohlenstoff usw. löslichen Form enthalten. In konsequenter Verfolgung dieses Standpunktes muß man auch die Steinkohle, welche bei der Destillation Teer gibt, als bituminösen Stoff ansprechen, obwohl sie das Bitumen nicht in löslicher Form enthält.

Eine noch weitere Ausdehnung des Begriffes Bitumen auf Stoffe, die nicht wie Braunkohle, Steinkohle, bituminöser Schiefer, veränderte Reste pflanzlicher oder tierischer Lebewesen enthalten, aber wie z. B. Cellulose beim Destillieren auch Teer geben, erscheint nicht ratsam.

2. Monographie der technisch wichtigen natürlichen Bitumina und deren Verarbeitungsprodukte. 2a) Erdgas. 1. Vorkommen. Erdgas kommt meistens und

Technische Bitumen.

A. In der Natur vorgebildet.

I. Verseifbare (hauptsächlich Wachsester)
Sapropelwachs, Algenwachs, Braunkohlenbitumen (Rohes Montanwachs).
Diese Wachse sind in der geologischen Folge ihrer Bildung als ältere Vorstufen zu den unter II genannten Stoffen anzusehen.

II. Nicht verseifbare

Hauptbestandteile Kohlenwasserstoffe (daneben bei flüssigen u. festen Bituminas oxydierte u. geschwefelte Kohlenwasserstoffe

- Erdgas
- Erdöl, flüssig bis breiig
  - Destillate
    - Oele: Petroleumbenzin (bis 150° siedend) Leuchtpetroleum, Petroleumgasöl, Mineralschmieröl.
    - Erdöl-Paraffin
  - Rückstände: a) flüssige Schmieröle, b) zähe mit Glasstab noch bewegliche „Erdölgoudron“, härtere „Erdölpeche“, Erdölkoke ist der letzte Destillationsrückstand.
- Erdwachs (Ozokerit) (fest) hierdurch durch Raffination Ceresin gewonnen, durch Destillation Paraffin u. Oel.

feste oder zähflüssige geschwefelte und oxydierte Kohlenwasserstoffe Naturasphalt, Bergteer. Ersterer enth. 0,8 bis 12% Schwefel.

B. Künstlich durch Zersetzungs-Destillation (z. T. destruktive Destillation sog. Schwelung) organischer Naturstoffe und Rohbitumina oder organischer Abfallstoffe gewonnene bituminöse Oele oder Teere.

I. Braunkohlenteer reich an Paraffin

- Destillate
  - Oele, Braunkohlenteerbenzin, Solaröl, Gasöl, Paraffinöl usw. enth. 0,8 bis 1,4% Schwefel.
  - Braunkohlenteer-Paraffin.
- Rückstände
  - Braunkohlenteergoudron (weich) u. Braunkohlenteerpech (hart), Braunkohlenteerkoke ist der letzte Destillierrückstand.

II. Schieferteer verhält sich nebst Destillaten ähnlich wie bei Braunkohlenteer

- Destillate
  - Oele
  - Schieferölparaffin.
- Rückstände

III. Steinkohlenteer enthält beträchtliche Mengen freien in Benzol nicht lösl. Kohlenstoffs u. hochmolekulare Kohlenwasserstoffe, wie Naphthalin, Anthracen und Phenantren

- Destillate
  - Leichtöl (Benzol, Toluol, Xylol usw.) Mittelöl, Schweröl-Anthracenöl.
- Rückstand
  - Steinkohlenteer (Goudron), Pech.

IV. Holzteer (Kienteer), enth. im Gegensatz zu Steinkohlenteer wenig od. keinen freien Kohlenstoff aber reichlich Phenole u. saure wässer. Anteile (Essigsäure).

- Destillate
- Rückstand
  - Holzteerpech.

V Fettteer (Fettpech). Rückstände d. Destillat. von Fetten (Palmfett, Wollfett, Fettsäure) enthält stets freie Fettsäuren u. Neutralfett in merklichen Mengen, heißen im Handel „Stearinpech, Wollpech usw.

VI. Torfteer entsteht bei der trockenen Destillation von Torf.

Oelgasteer entsteht aus Gasöl bei der Herstellung von sog. Fettgas.

Wassergasteer entsteht bei der Karburierung des Wassergases mit Gasöl.

Knochenteer, Melasseteer, Schlempeteer entst. bei d. trocken. Destillation von Knochen bezw. Melasse od. Schlempe.

zwar in sehr beträchtlichen Mengen als Begleiter des Erdöls oder in der Nähe von Erdölquellen vor. So sind z. B. die heiligen Feuer von Baku, zu denen seit den ältesten Zeiten die Parsen (Feueranbeter) pilgern, Erdgasquellen, die durch eigenen Druck durch Erdspalten an die Oberfläche dringen. Der oft ungeheuer große Druck der das Erdöl beglei-



Fig. 1. Eruption einer Sonde der angebohrten Petroleumschicht in Campina (Rumänien).

tenden Erdgase bewirkt bisweilen, daß das Erdöl beim Erbohren einer unter solchem Gasdruck stehenden Erdschicht mit solcher Heftigkeit an die Oberfläche geschleudert wird, daß Bohrgeräte emporgerissen und die Bohrtürme sehr beschädigt werden (s. Fig. 1).

In den Vereinigten Staaten von Amerika, besonders in Pennsylvanien finden sich im Zusammenhang mit Erdöl die größten Vorkommen von Erdgasen, die schon seit Jahrzehnten daselbst aufgefangen und technisch verwendet werden.

Es gibt allerdings auch Erdgasvorkommen, wie z. B. das neuerdings in Deutschland aus Anlaß von Wasserbohrungen beobachtete von Neuengamme bei Bergedorf, welche nicht direkt in Zusammenhang mit Erdölvorkommen gebracht werden können, wenn auch das Gas demjenigen der Erdölgase verwandt zusammengesetzt ist. Auch das vor kurzem bei Horsterbusch in Westpreußen beobachtete nur ganz kleine Vorkommen von brennbarem Erdgas in $11^1/_4$ m Bohrtiefe konnte nicht mit Erdölvorkommen in Verbindung gebracht werden. Man nahm hier an, daß es sich um die Verwesungsprodukte eines fetten Kadavers aus der Vorzeit handelte.[1]

2. Entstehung. Man faßt das Erdgas im allgemeinen als leichtesten Bestandteil des Erdöls auf und bringt daher seine Entstehung in unmittelbaren Zusammenhang mit derjenigen des Erdöls, dessen leichtest siedender Bestandteil es ist. Bei denjenigen Erdgasvorkommen, wo keine unmittelbare Nähe von Erdöl festgestellt werden kann, muß man entweder annehmen, daß es durch Wanderung über Spalten aus ferneren, der Mutung schwerer zugänglichen Erdölschichten stammt oder durch trockene Destillation verkohlter Pflanzenreste entstanden ist. Es gibt aber auch Erdgase, die nach ihrer Zusammensetzung und Herkunft anderen Ursprungs sein können.

3. Gewinnung. Das Erdgas wird zur Verwertung für technische Zwecke, z. B. zum Betrieb von Motoren usw. in Gasometern aufgefangen und von diesen den jeweilig in Frage kommenden Verwendungszwecken durch weitere Rohrleitungen zugeführt.

4. Produktionsmengen. Die Gasbrunnen geben sehr verschiedene Ausbeuten, z. B. in Oklahoma in den Vereinigten Staaten täglich von einigen cbm bis zu $^1/_4$ Mill. cbm. Im Durchschnitt werden in Oklahoma etwa 50 Mill. cbm Gas täglich gewonnen. Dabei ist zu berücksichtigen, daß dort nur $^1/_5$, vielleicht nur $^1/_{10}$ des gesamten Gasvorrates angebohrt wird.

5. Verwendung. Wie schon erwähnt, wird das Erdgas, da es meistens in der Hauptsache aus brennbarem Methan besteht, als Ersatz für Steinkohlengas zum Betriebe von Motoren auch zu sonstigen Heizzwecken für Fabrikations- und häusliche Zwecke z. B. auch als Leuchtgas benutzt. Industriell wird es in den Vereinigten Staaten in Zinkschmelzen, Zementfabriken, Ziegeleien usw. als Heizstoff benutzt. Auch bei Neuengamme wurde

[1]) Petroleum VI. Jahrgang 1911, S. 458.

das Erdgas, nachdem man die Brände der Gasausbrüche beseitigt hatte, in Gasometern aufgefangen und Heizzwecken zugeführt, aber auch zur Füllung von Luftballons benutzt.

Erdgas, das genügenden Gehalt an bei gewöhnlicher Temperatur flüssigen höhermolekularen Kohlenwasserstoffen mit sich führt, wie dies z. B. bei den mit Erdöl zusammen vorkommenden Gasen der Vereinigten Staaten der Fall ist, wird in neuerer Zeit von der Bessemer Gas Engine Cie. auf Gasoline durch starke Kompression und Abkühlung, die das von hohem Druck plötzlich auf gewöhnlichen Druck entspannte Gas selbst herbeiführt,[1]) verarbeitet. Die oben genannte Gesellschaft hat bisher etwa 70 Gasolin-Erdgasanlagen gebaut, die über fast alle Oelfelder der Vereinigten Staaten verteilt sind.

6. Chemische Zusammensetzung. Die Hauptbestandteile des Erdgases sind leichte, gesättigte Kohlenwasserstoffe, hauptsächlich Methan, daneben finden sich oft noch andere gesättigte und ungesättigte Kohlenwasserstoffe, Kohlenoxyd usw. Das im Jahre 1909 in der Mitte des siebenbürgischen Tertiärbeckens gefundene Erdgas war nahezu reines Methan, es enthielt 99,25% Methan und 0,75% Stickstoff. Ein Naturgas in Norddakota (Vereinigte Staaten), das 1907 erbohrt wurde, enthielt 82,7% Methan, 12,4% Stickstoff, 1,2% Kohlenoxyd, 3% Sauerstoff und 0,2% Aethylene.

2b) Rohpetroleum. 1. Vorkommen. Rohpetroleum ist je nach der Herkunft dünn- bis dickflüssig oder, wenn es paraffinreich ist, in der Kälte dünnsalbenartig farblos, gelblich oder bräunlich bis tiefschwarz, von bituminösem z. T. unangenehm lauchartigem Geruch. Es besteht in der Hauptsache aus Kohlenwasserstoffen und findet sich im Erdinnern bis zu 1200 m Tiefe z. T. auch ganz nahe der Erdoberfläche in allen Erdteilen.

Die ganz zähflüssigen fast teerartigen Vorkommen heißen Bergteer (s. unter c) und bilden den Uebergang zu Asphalt.

Das Rohpetroleum findet sich gewöhnlich als Imprägnierung poröser, zelliger oder erdiger Gesteine (Brandschiefer, Oelschiefer, bitumenreicher Kalksteine oder Sandsteine), seltener findet es sich nach früheren Annahmen auch in größeren Ansammlungen innerhalb unterirdischer Hohlräume und Gesteinsklüfte. Beide Arten des Vorkommens sollen für Nordamerika in Betracht kommen, im Bezirke Enniskiller in Canada West, am Oil Creek im nördlichen Pennsylvanien nahe der Grenze von Nord-New-York, am Kanowha in Ohio, am Boyd in Kentucki, wo das Petroleum sowohl silurische als auch devonische und karbonische Schichten reichlich imprägniert, als auch sich in Spalten und Klüften ansammeln soll und teilweise in künstlich angelegten Brunnen in die Höhe sprudelt, zum Teil zutage gepumpt wird.

Eine größere Anhäufung von Petroleum heißt Lagerstätte und zwar primäre, wenn sich in ihr die Bildung des vorgefundenen Petroleums vollzogen hat, sekundäre, wenn das Petroleum an den sekundären Lagerort erst hingewandert ist.

Da es als Flüssigkeit allein keine Schicht bilden kann, so bedarf es eines Trägers, z. B. Sand, Sandstein, Schotter, Konglomerat usw. Nach Höfer ist die frühere Annahme, daß die unterirdischen Oelreservoire zum Teil mit Oel gefüllte große Höhlen seien, unrichtig, da man solche beim Bohren mit dem Meißel hätte finden müssen.

Die Gestalt der porösen Sedimente, in denen sich das Petroleum findet, ist auch diejenige des Oellagers. Ist die Gestalt des Oellagers plattenförmig und auf größere Entfernung ausgedehnt, so heißt es „Flöz", ist es linsenförmig, so heißt es „Lager", und bei besonders ausgeprägter Ausdehnung nach einer Richtung heißt es „Lagerschlauch". Vielfach liegen auch mehrere Lager oder Flöze übereinander, wodurch sogenannte Züge entstehen; z. B. liegen in Pechelbronn (Elsaß) sechs Schlauchzonen übereinander.

Wenn das Oel in der Lagerstätte viel Gas einschließt, so steht es unter hohem Druck, der beim Erbohren alsdann oft Herausschleudern von Gesteinsstücken oder der schweren Bohrgestänge und selbsttätiges längeres Hervorsprudeln des Petroleums als sogenannte Springquelle verursacht. Solche Springquellen finden sich vielfach in Nordamerika, Baku und in Tustanovice in Galizien, wo das Oel in 1100 bis 1200 m Tiefe erbohrt wird.

Gasdruck und Schwere sowie die Kapillarität bewirken, daß das Petroleum auch von primärer Lagerstätte durch Spalten nach sekundären Lagerstätten in porösen Gesteinen oberhalb und unterhalb der primären Lagerstätten wandert. Die sekundäre Lagerstätte kann als „Oelgang" in Spalten oder als „Lager" oder „Flöz" in porösen Gesteinen auftreten. Je nach dem Druck der Gase kann das Oel mehr oder weniger hoch, unter Umständen auch bis zur Oberfläche in Spalten getrieben werden und kann sich bei entsprechender Gestaltung der Austrittsstelle als Oelgrube oder Lake zeigen, in denen es in erhöhtem Maße der Verdunstung und Oxydation ausgesetzt ist.

2. Entstehung. Den Ursprung des Erdöls führte man in früheren Jahren auf Einwirkung von Wasserdampf auf glühende Eisenkarbide zurück (sogenannte Emanationshypothese von Mendelejeff). Wie

[1]) Frank P. Peterson, Petroleum, VI. Jahrgang, S. 2179, 1911.

im Laboratorium aus kohlehaltigem Eisen durch Einwirkung von verdünnten Mineralsäuren Kohlenwasserstoffe von erdölartiger Beschaffenheit entstehen, so wurde eine ähnliche Zersetzung im Erdinnern durch Wasserdampf angenommen. Durch Risse und Spalten sollen die zunächst natürlich in Dampfform gebildeten Kohlenwasserstoffe nach höher gelegenen kälteren Schichten destillieren und sich dort verdichtet haben.

Nach einer anderen später entstandenen sogenannten organischen Hypothese der Erdölentstehung wurde angenommen, daß das Erdöl aus Pflanzenresten (Cellulose) durch heiße Zersetzungsprozesse entstanden sei. Die Emanationshypothese erhielt im vorigen Jahrhundert noch eine neue Spielart durch die interessanten Versuche von Sabatier und Senderens, welche durch gleichzeitige Einwirkung von Acetylen und Wasserstoff auf feinverteilte Metalle wie Nickel, Kupfer usw. Kondensationen zu völlig petroleumartigen Kohlenwasserstoffen erzeugten und aus diesen Vorgängen Ausblicke auf ähnliche Petroleumbildungen in der Natur eröffneten, wobei sie als Ausgangsprodukt für das Acetylen gegeneinander reagierende Karbidlager und Wasser annahmen.

Die vorstehend kurz gestreiften Hypothesen sind aus geologischen und chemischen Gründen heute fast völlig verlassen und zwar zugunsten der von H. Höfer geologisch begründeten und von C. Engler experimentell erhärteten Theorie der Bildung des Erdöls aus Resten der Mikrofauna von Meerwassertieren und -Pflanzen (Oelalgen), insbesondere deren bei der Verwesung zurückbleibenden Fettbestandteilen und von Fettresten, die aus der Mikrofauna und Flora von Landseen (Sapropel von Potonié) entstanden sind.

Der endgültige Sieg der Engler-Höferschen Theorie der Erdölbildung gegenüber der älteren Emanationshypothese wurde dadurch herbeigeführt, daß Tschugajeff neuerdings auf die schon 1835 von Biot beobachtete optische Aktivität des Erdöls hinwies. Da diese nur von Substanzen herrühren konnte, die aus organisierter Materie stammen, so war eine Entstehung des Erdöls auf vulkanischem Wege ausgeschlossen.

Die Entstehung des Erdöls durch pyrogene Prozesse aus nicht fettartigen Pflanzenresten wie Cellulose war nach C. Engler aus chemischen Gründen nicht erklärlich, weil nach genauer Berechnung bei Herausnahme des in der Cellulose enthaltenen Sauerstoffes als Wasser, höchstens Kohle, nicht aber Kohlenwasserstoffe von der Zusammensetzung des Erdöls zurückbleiben konnten.

Nachdem H. Höfer u. a. die geologischen Gründe für die Entstehung des Erdöls aus den Resten einer marinen Fauna dargelegt hatte, und nachdem insbesondere auf die Versteinerungen in den Petroleum führenden Schichten, ferner auf die brom- und jodhaltigen Begleitsalzwässer usw. hingewiesen worden war wies Engler am Versuch im Laboratorium nach, daß man aus Fischtran durch Druckdestillation tatsächlich ein vollständig petroleumartiges Produkt erhalten könne, in dem alle wesentlichen Bestandteile des natürlichen Erdöls festgestellt werden konnten[1]). Die schwereren schmierölartigen Anteile der Rohöle sollen nach Englers, durch einleuchtende Laboratoriumsversuche erhärteten Annahme aus den ursprünglichen leichteren Zersetzungsprodukten der Fette und Wachse wenigstens teilweise durch Polymerisation entstanden sein. Für Englers und Höfers Annahmen eines marinen Ursprungs des Erdöls spricht der Umstand, daß die primären Lagerstätten immer marine Bildungen sind. Die Englersche Theorie hat eine sehr große Zahl von Studien anderer Autoren im Gefolge gehabt, die sich mit der Natur der Ausgangsmaterialien der Erdölbildung, der Ursachen der optischen Aktivität des Erdöls und der Veränderungen beschäftigen, welchen das Erdöl in chemischer und physikalischer Hinsicht bei seinen Wanderungen im Erdinnern ausgesetzt ist. Diese Studien haben es wahrscheinlich gemacht, daß nicht nur tierische marine Ueberreste, sondern auch die abgestorbene Mikroflora und Mikrofauna von Binnengewässern, womit Engler auch einverstanden ist, an der Erdölbildung mitgewirkt haben.

So hält H. Potonié[2]) das Petroleum für ein Destillationsprodukt des bituminierten Faulschlammes (Sapropel), eines zoophytogenen aus dem Plankton unbewegter Gewässer durch Fäulnis entstandenen organischen Gesteins, von Engler neuerdings[3]) Anabitumen bezeichnet, das reich an Wachs und Harzresten ist. Je nachdem durch die anorganischen Skelette der in den Schlamm gehenden Organismen oder andere Einflüsse, z. B. Wind, anorganische Stoffe wie Sand, Kalk oder Ton in den Sapropel kommen, entstehen Diatomeenpelite, Sapropelkalke, Sapropeltone. Durch Verdunstung des Wassers wird der Faulschlamm gallertartig (Saprokoll) und bildet alsdann elastische zähe Gesteine von schieferiger Struktur, die schließlich unter Abgabe von Sauerstoff in Bitumen, von Engler jetzt[4]) je nach dem

---

[1]) Ber. d. chem. Ges., Bd. 21 S. 1816 (1888), Bd. 22 S. 592 (1889), Bd. 26 S. 1440 (1893), Bd. 30 S. 2358 (1897).

[2]) Vgl. hierzu Monke und Beyschlag, Ueber das Vorkommen des Erdöls, Ztschr. für praktische Geologie 1905, 13 und H. Potonié, Die Entstehung der Steinkohle und der Kaustobiolithe überhaupt, 1910, 5. Aufl.

[3]) Petroleum. VII, S. 400 (1912).

[4]) Ebenda.

Alter und Zersetzungsgrad Poly- oder Katabitumen bezeichnet, übergehen. Letzteres soll die Muttersubstanz des Petroleums sein, das Engler jetzt Ecgnobitumen nennt.

G. Krämer hält nach Untersuchungen des Wachsgehaltes in dem ausgetrockneten Schlamm eines norddeutschen Binnensees, das sich in diesem Schlamme in großen Mengen findende Algenwachs für das Rohmaterial der Erdölbildung, da ebenso wie Fette auch Wachse bei der Druckdestillation — was nach Englers Versuchen an Tran nicht zweifelhaft war — petroleumartige Kohlenwasserstoffe liefern.

Engler und Höfer nahmen an, daß bei der Verwesung der Tierleichen zunächst die Eiweißsubstanzen in wasserlösliche Verbindungen übergingen; z. T. ist der Stickstoff noch, wie der Stickstoffgehalt einzelner Erdöle, z. B. desjenigen von Texas annehmen läßt, in dem später aus den Fettresten entstandenen Erdöl verblieben. Nach der vollständigen Verwesung der Eiweißstoffe blieb das beständigere Leichenwachs zurück. Ueber die weitere Umwandlung des letzteren sind die Meinungen noch nicht geklärt. Künkler und Schwedhelm[1]) nehmen auf Grund von Laboratoriumsversuchen, die positiven Erfolg hatten, an, daß die bei der Verwesung der Tierleichen usw. zurückbleibenden Fette mit kohlensaurem Kalk sich zu fettsaurem Kalk umgesetzt haben, und dieser bei der Destillation Erdölkohlenwasserstoffe, insbesondere gleich primär die hochmolekularen Schmierölkohlenwasserstoffe ergeben habe. Höfer[2]) selbst läßt es, die verschiedenen Möglichkeiten der Zersetzung des Leichenwachses zusammenfassend, dahingestellt, ob bei dieser zweiten Phase des Uebergangs von Fett und Wachs in Erdöl in der Hauptsache neben der Entstehung der Kohlenwasserstoffe eine Kohlensäureabspaltung, ob die Wirkung von Fermenten oder aber eine unter gewöhnlichen Druck- und Temperaturbedingungen mit der Zeit von selbst verlaufende also energieauslösende oder endlich eine durch die gesteigerten Faktoren von Druck und Temperatur verlaufende gewaltsame Reaktion anzunehmen ist.

Bemerkenswert bezüglich der Beurteilung vorstehender Möglichkeiten sind Untersuchungen von Sabatier, Mailhe, Senderens und Ipatiew über die katalytische Einwirkung, die Metalloxyde, auch z. B. Tonerde (Ipatiew) bei der Zersetzung von Estern zu Kohlenwasserstoffen ausüben, und neuere Versuche, die N. C. Hviid[3]) unter Destillation von Fetten bei Gegenwart von amorphe Kieselsäure enthaltenden Tonen und in Abwesenheit dieser Tone angestellt hat. Nach diesen Versuchen, welche stets eine viel schnellere und bedeutend reichlichere Bildung von Kohlenwasserstoffen bei Gegenwart des kieselsäurereichen Tones ergaben, ist anzunehmen, daß letzterer durch Erhöhung des Kapillardruckes und katalytisch die Zersetzung zu Erdöl begünstigen kann, daß hierbei auch eine vorübergehende Verseifung von Fettsäuren stattgefunden (s. a. oben Künkler und Schwedhelm) und daß ähnliche Vorgänge bei der Erdölbildung in der Natur eine Rolle gespielt haben.

Engler und Severin halten nach experimentellen Kontrollprüfungen an bituminösen Gesteinen die Gegenwart von Kalkseifen in den Uebergangsstufen zum Erdöl nicht für wahrscheinlich[1]) Ubbelohde und Woronin[2]) zeigen, daß der Partialdruck der Gase den Verlauf der Umwandlung des Erdöls unter Einfluß der Katalysatoren sehr beeinflussen kann.

Die Ursache der optischen Aktivität des Erdöls kann man nach J. Marcusson in den Zersetzungsprodukten des optisch stark aktiven, in Fetten und Wachsen in kleineren oder größeren Mengen enthaltenen Cholesterins, eines hochmolekularen Alkohols der Formel $C_{27}H_{46}O$ oder dessen Isomeren z. B. Phytosterin erblicken. C. Neuberg ist der Ansicht, daß die optisch ebenfalls aktiven Umwandlungsprodukte der Eiweißprodukte, die Aminosäuren, nach erfolgter Desamidierung und Kuppelung mit anderen Fettsäuren bei der weiteren Umlagerung optisch aktive Kohlenwasserstoffe, die in die erdölartigen Fettzersetzungsprodukte übergegangen sind, geliefert haben. Man wird vorläufig auch die letztgenannte Möglichkeit der Bildung der optisch aktiven Stoffe bei der Theorie der Erdölbildung mit berücksichtigen müssen.

3. Gewinnung. Das Rohpetroleum wird heutzutage allgemein durch Bohren mittels Meißel gewonnen. Die Gewinnung durch Ausschöpfen aus Gruben, in denen sich das Oel an der Erdoberfläche ansammelt, ist sporadisch und eine ganz untergeordnete. Dagegen sind noch in manchen Erdölgegenden Schachtbrunnen im Betrieb, z. B. in Rumänien. Hier werden etwa 1 m breite bis zu 150 m tiefe Schächte bis zu den Oelschichten geführt, und das Oel wird mit Eimern vom Bergmann direkt geschöpft. Hierzu erfolgt das Herablassen des Bergmanns und des Schöpfeimers ganz primitiv mittels aufgehaspelter Seile, die durch Göpelbetrieb aufgerollt werden. Große Blasebälge,

[1]) Seifensiederztg., 25 S. 165 (1908).
[2]) Engler-Höfer, Das Erdöl Bd. II, S. 118 (1909).
[3]) Petroleum, VI. Jahrgang 1911, S. 429.

[1]) Ztsch. f. angew. Chem. XXV, S. 154 (1912).
[2]) Petroleum VII, S. 13 u. 334 (1912).

welche neben den Schächten stehen, führen dem Bergmann frische Luft zu.

Das durch Bohrung gewonnene Oel dringt entweder durch den Druck der Gase als Springquelle an die Oberfläche oder es wird, falls der eigene Druck nicht ausreicht, durch Pumpen gefördert. Die Tiefe der Bohrungen ist sehr verschieden. In Galizien, z. B. in dem sehr ölreichen Boryslaw und Tustanowice sind die Bohrungen 1100 bis 1200, in Rumänien 200 bis 350, in Deutschland 150 bis 350 m tief. Die Erträge der einzelnen Bohrlöcher sind in den ölreichen Ländern oft sehr hoch, z. B. haben die Springquellen in Tustanowice in den sehr ergiebigen Quellen zuweilen bis zu 100 Zisternen (à 10 000 kg) und darüber Oel ausgeworfen, so daß daselbst die etwa 100 000 bis 200 000 Kr. betragenden Herstellungskosten einer tiefen Sonde öfter nach 1 monatlicher Tätigkeit der Sonde schon amortisiert waren. In Amerika gibt es aber noch weit ertragreichere Brunnen.

Figur 2 zeigt eine Reihe von Bohrtürmen in Rumänien am Petroleumsee in Baicoiu und die neben den Türmen stehenden Holzschuppen für die Antriebmaschinen, welche die Bohr- und Pumpgeräte treiben. Die Pumpen werden in den rumänischen Erdölgebieten zum Teil durch Erdgasmotoren, meistens aber durch Dampfmaschinen betrieben, die durch Oelheizung gespeist werden.

Neuerdings werden in Bustenari (Rumänien), dessen mehrere 100 Brunnen aufweisendes Sondenfeld Figur 3 zeigt, von einer Maschine aus durch horizontal liegende sogenannte Kehrräder gleichzeitig die Pumpgestänge von 15 Bohrtürmen getrieben, wodurch außerordentliche Ersparnis an Bedienungspersonal erzielt wird.

Figur 1 zeigt die plötzliche Eruption eines angebohrten Petroleumlagers, die mit Selbstentzündung des ausgeworfenen Rohöls verbunden ist.

Das durch eigenen Druck oder durch Pumpwerke gewonnene Oel wird, wenn es viel Schlamm und Wasser enthält, vielfach erst, bevor es den Oelraffinerien zugeführt wird, durch Dampfschlangen in zylindrischen, unten mit Ablaßhähnen versehenen Eisenblechgefäßen erwärmt, damit es sich klärt und Wasser und Schlamm sich unten absetzen.



Fig. 2. Das neue Bohrfeld (1906) am Petroleumsee in Baicoiu (Rumänien).

Die Zuführung des Oeles zu den Raffinerien, in denen das Rohöl durch Destillation und Raffination auf Benzin, Leuchtöl, Gasöl, Schmieröl usw. verarbeitet wird, geschieht bei primitiven Einrichtungen, wie z. B. bis vor einigen Jahren noch in Wietze bei Hannover durch Transport in Zisternen oder



Fig. 3. Oelbrunnenfeld in Bustenari (Rumänien).

Fässern in Wagen, in der Regel aber bei einigermaßen entwickelten Anlagen durch Röhrenleitungen von oft viele 100 km betragender Länge, die in Amerika gewöhnlich „pipelines" heißen. Ist das Oel wie z. B. in Boryslaw und Tustanowice sehr paraffinreich und infolgedessen im Winter leicht erstarrend, so muß es durch dampferwärmte Rohrleitungen geschickt werden, damit es flüssig bleibt. Die Bewegung des Oels in den Röhrenleitungen erfolgt, wenn die Bohrtürme höher liegen als die Raffinerien, durch den eigenen Druck des Oeles, sonst durch mechanische Pumpenanlagen. Durch letztere wird das Rohöl z. B. auch nach den großen Eisenblechbehältern (Tanks) und von diesen in die Eisenbahnzisternen oder Schiffe gepumpt.

4. Produktionsmengen. Die Weltproduktion an Rohpetroleum stellt sich nach David T. Day im Jahre 1909 wie folgt:

	Millionen Tonnen	Prozente der Totalproduktion
Vereinigte Staaten	24,28	61,24
Rußland	8,80	22,19
Galizien	2,08	5,02
Holl. Ostindien . .	1,47	3,71
Rumänien	1,30	3,13
Indien	0,89	2,24
Mexiko	0,33	0,84
Japan einschl. Formosa	0,27	0,68
Peru	0,18	0,44
Deutschland . . .	0,14	0,34
Canada	0,06	0,14
Italien	0,007	
Andere (geschätzt).	0,004	0,03
Total	39,8	100

Wie obige Zusammenstellung ergibt, stehen die Vereinigten Staaten an der Spitze der gesamten Petroleumproduktion. Dementsprechend ist auch daselbst die Erdgasproduktion am größten. Inzwischen ist im Jahre 1910 die amerikanische Petroleumproduktion auf 28,4 Mill. Tons, diejenige Rußlands nur auf 9 Mill. gestiegen, und die galizische hat sich um $^1/_3$ Mill. Tons vermindert. Die rumänische und deutsche Produktion haben sich bis zum Jahre 1910 nicht wesentlich geändert.

5. Verwendung. Das Rohpetroleum enthält alle Bestandteile, welche das Benzin, Leuchtpetroleum, Gasöl, Schmieröl und Paraffin enthalten, in sich zusammengemischt. Daher wird es durch Destillation auf die genannten Produkte verarbeitet. Die Rohdestillate bedürfen in meisten Fällen noch einer gewissen Reinigung, ehe sie als fertiges Benzin, Leuchtöl usw. in den Handel gehen. Das fertige Benzin dient als Reinigungsmittel, Extraktionsstoff für Fette, Triebstoff für Motoren, Beleuchtungsstoff usw. Die leichtesten Benzine werden auch zum Anästhesieren benutzt. Die zwischen dem leichten Benzin und dem Leuchtpetroleum destillierenden Oele, die sogenannten Schwerbenzine, dienen als Ersatz für Terpentinöl oder als Verschnittmittel für dieses zum Auflösen von Lacken. Die Hauptmengen an Benzin sowie an Leuchtpetroleum liefert das an letzterem besonders reiche amerikanische Oel.

Rohöl selbst wird auch ebenso wie insbesondere die noch flüssigen Rückstände der Destillation zum Heizen von Lokomotiven, Schiffskesseln, aber auch als Triebstoff für Dieselmotoren usw. benutzt. Die Oelfeuerung bietet vor der Kohlenfeuerung den Vorteil der Asche- und Rauchfreiheit, der leichten Transportfähigkeit (durch Röhrenleitungen wird das Oel in die Tanks usw. gepumpt), geringen Rauminanspruchnahme und hohen Heizwerts. Oel kann aber als Heizstoff, abgesehen von der Verwendung als Antriebsstoff beim Dieselmotor, nur in ölreichen Ländern mit der Kohle konkurrieren, weil sich der Heizwert sonst zu teuer stellt.

Die höher siedenden Oele des Rohpetroleums dienen als Transformatorenöle, d. h. als isolierende Füllflüssigkeit der Transformatoren, insbesondere aber als Schmieröle für die mannigfaltigen Maschinen, Motoren, Dampfzylinder, Turbinen usw.

Das aus paraffinreichen Rohölen abgeschiedene feste Paraffin wird in gereinigtem Zustand als Kerzenmaterial, zum Imprägnieren von Leder, Papier, Streichhölzern usw. benutzt. Die flüssigen dunklen Rückstände der Destillation dienen als Eisenbahnwagenschmieröl, die zähen Rückstände der Destillation als Kunstasphalt für Abdichtung, Isolierung bei Bauten, als Lackgrundlagen usw.

Wird die Destillation so weit getrieben, daß Koks zurückbleibt, so kann dieser als Elektrodenmaterial für Bogenlampen vorteilhaft benutzt werden.

6. Chemische Zusammensetzung. Erdöl besteht vorwiegend aus flüssigen, zum geringeren Teile aus festen Kohlenwasserstoffen, von denen die ersteren teils der gesättigten Paraffinreihe, teils ungesättigten Reihen, teils den sogenannten Naphthenreihen oder auch der aromatischen Reihe angehören. Die festen Kohlenwasserstoffe gehören fast ausschließlich der Paraffinreihe an. In der Regel finden sich auch in an festem Paraffin reichen Erdölen größere Mengen leichterflüchtiger Benzinkohlenwasserstoffe der Paraffinreihe. Je nachdem Naphthene oder gesättigte bezw. zyklische ungesättigte Kohlenwasserstoffe überwiegen, ändert sich der Charakter des Oeles in physikalischer

Hinsicht. Außer den genannten Hauptbestandteilen enthalten die Erdöle meistens noch dunkelfärbende harz- bezw. asphaltartige sauerstoff- und schwefelhaltige Stoffe, welche mehr oder weniger starke Dunkelfärbung der Oele verursachen.

2c) Bergteer, Naturasphalt. 1. Vorkommen. Bergteer,[1]) auch Malthe oder Elaterit genannt, ist ein dickflüssiges bis halbweiches Zwischenprodukt, das zwischen Erdöl und festerem Asphalt steht und in einigen selteneren Fällen aus der Erde quillt, sonst aber an Schiefer, Sand oder Dolomit, meistens indessen an Kalkstein mechanisch gebunden ist und mit diesen Stoffen die große Gruppe der Asphaltgesteine (bituminöser Schiefer, Sand, Dolomit oder Kalkstein) bildet.

So findet sich z. B. in Derna und Tataros in Südungarn Bergteer als bituminöser Sand, er wird durch Ausschmelzen mit heißem Wasser in langgestreckten horizontalen Gefäßen gewonnen, wobei der zu Boden sinkende Sand durch Transportschnecken entfernt, der oben auf dem Wasser schwimmende Teer durch Ueberlaufvorrichtungen abgenommen wird.

Da dieses Bitumen auch bei gewöhnlicher Temperatur zu weich ist, um als Asphalt benutzt zu werden, wird es erst durch Destillation mit Dampf von den leichteren Teilen, welche als Schmieröl usw. Verwendung finden, befreit und so in härteren Asphalt übergeführt.

In fester Form findet sich der Bergteer als sogenannter Asphalt (Judenpech und Bergpech sind veraltete Bezeichnungen). ἡ ἄσφαλτος, der griechische Ausdruck für Erdpech, bezeichnet einen unveränderlichen Körper.

Von Bergteer imprägnierter bituminöser Kalkstein (Stinkkalk) findet sich im Kanton Neuchatel (Val Travers, Seyssel im Rhônetal), in Italien (St. Valentino), auf Sizilien, in Dalmatien (Ragusa), im Elsaß (Pechelbronn und Lobsann), Hannover (Limmer), Vorwohle in Braunschweig.

Die am längsten bekannte Fundstätte von Asphalt, und zwar in reiner Form, ist das Tote Meer, an dessen Ufern und aus dessen 394 m unter dem Spiegel des Mittelmeers liegenden Oberfläche Asphalt, besonders nach Erdbeben in größerer Menge durch Abschöpfen gewonnen wird (sogenannter Syrischer Asphalt). Das Wasser des toten Meeres ist stark salzhaltig, es enthält über 20% Salze. Aus mehreren benachbarten heißen Quellen fließt Asphalt mit Wasser in den See und erhärtet darin beim Erkalten zu Stücken, welche infolge des hohen spezifischen Gewichts des Wassers auf dessen Oberfläche schwimmen.

In neuerer Zeit hat das Asphaltlager auf der Insel Trinidad infolge günstigerer Gewinnungs- und Versendungsbedingungen eine größere Bedeutung gewonnen als der vorher erwähnte Fundort.[1]) Der Trinidadasphalt wird an einem der Westküste der Insel nahen 80 Fuß über dem Meer gelegenen Pechsee, dessen Umgebung erstarrter Asphalt (also Erdpech) ist, gewonnen. Das Bitumen quillt hier ständig an der Oberfläche des 1½ engl. Meilen Umfang besitzenden Sees auf, der 50 bis 60 ha groß und mehr als 50 m tief ist.

Schon Columbus und später Sir Walther Raleigh dichteten ihre Schiffe mit Pech ab, das sie auf Trinidad fanden. Die systematische industrielle Ausbeutung begann aber erst in den 80 er Jahren des vorigen Jahrhunderts. Der See ist auch bei der höchsten Tagestemperatur noch so fest an der Oberfläche, daß er ohne Gefahr begangen werden kann. Früher war der See so voll, daß er öfter nach dem Meer übergelaufen ist, und noch heute findet man derartige in das Meer übergelaufene Asphaltströme.

2. Entstehung. Man nimmt im allgemeinen an, daß der Asphalt durch Oxydation, Polymerisation und teilweise Verdunstung von Erdöl entstanden ist, ein Vorgang, der auch im Laboratorium beim Erhitzen beliebiger hochsiedender Mineralöle unter Luftzutritt nachzuahmen ist. Mit dieser Theorie allein ist aber die Frage der Entstehung des Asphalts deshalb nicht erschöpft, weil der natürliche Asphalt 1 bis 10% Schwefel enthält, dessen Menge sich nicht ohne weiteres aus der Herkunft des Asphalts aus Erdöl erklären läßt, weil letzteres an sich in der Regel nur kleinere Mengen Schwefel enthält. Der Schwefelgehalt des Asphalts läßt sich daher nur dadurch erklären, daß einerseits die schwefelärmeren Teile des Erdöls abgedunstet und schwefelreichere z. T. aufgesaugt von anorganischen Gesteinen zurückgeblieben sind, und daß andererseits Schwefel, aus dem Erdöl benachbarter Schichten, auf dieses bei höheren Temperaturen eingewirkt hat. Mit letzterer Annahme in Einklang steht das mehrfach beobachtete Vorkommen von Schwefel und schwefelwasserstoffhaltigen Wässern in der Nähe der Asphaltvorkommen z. B. in Sizilien, in Hannover usw.

3. Gewinnung. Die Gewinnung des Dernaer Asphalts aus bituminösem Sand und des Syrischen Asphalts ist schon unter „Vorkommen" beschrieben.

Das auf dem Pechsee in Trinidad gewonnene „Erdpech" enthält im Rohzustand

[1]) Hippolyt Köhler, Die Chemie und Technologie der natürlichen und künstlichen Asphalte. Braunschweig 1904.

[1]) E. Graefe Chem. Ztg. 35, S. 644 (1911).

$^1/_3$ Bitumen, $^1/_3$ erdige Anteile und sonstige mineralische und pflanzliche Verunreinigungen und $^1/_3$ Wasser; es wird in der Regenzeit fest und kann dann, wie bei uns der Torf, abgestochen werden. Die Reinigung des Trinidaderdpechs beschränkt sich an Ort und Stelle auf Schmelzen und etwa 12 stündiges Erhitzen im Kessel, wobei das Wasser zum größten Teile verdampft und erdige Bestandteile sich absetzen. Schwimmende Verunreinigungen (Holz usw.) werden abgeschöpft.

Das so gereinigte Produkt kommt als Trinidadasphalt puré oder „Epuré" in den Handel und enthält 50 bis 60% Reinasphalt, während das Rohpech 30% Wasser und 30% erdige Verunreinigungen enthält.

Der „Gilsonit" ist ein nahezu 100%iges, also ganz reines sprödes in Venezuela vorkommendes Bitumen, Bermudat-Asphalt — in Bermudas vorkommend — enthält etwa 90 bis 95% Reinasphalt, ist also auch fast reines Bitumen.

Die mit Verflüssigungsmitteln z. B. Petroleumölen versetzten reinen Bitumina, welche zum Imprägnieren von Dachpappe, Steinschottern usw. dienen, heißen „Zement".

Der Asphaltstein (bituminöser Kalkstein, Sandstein, Dolomit) wird in den Lagerstätten entweder durch Tagebau oder Schacht- und Stollenbau gewonnen.

Das gewonnene Asphaltsteinmaterial wird nach Entfernung des tauben Gesteins dem Bitumengehalt entsprechend als „fett" oder „mager" sortiert. Ein Bitumengehalt von 10% wird als normal angesehen.

Hierauf wird je nach dem geforderten Bitumengehalt eine geeignete Mischung vorgenommen. Dann wird das Material in „Gitterbrechern" zerkleinert, in Schleudermühlen (Desintegratoren) feingemahlen, gesiebt, sortiert und in Säcke gefüllt. Diese Pulver dienen zur Herstellung der als „Asphalt comprimé" oder „Stampfasphalt" bekannten Straßenbelege oder zur Erzeugung von Mastix, der zu Gußasphalt oder Asphaltisolierungen benutzt wird.

Für erstere soll der Bitumengehalt des Pulvers 12% nicht übersteigen, für Verarbeitung auf Mastix soll er höher sein, da dies einer Ersparnis an Goudron gleichkommt.

Mastix oder Asphaltmastix (Gußasphalt) ist ein Produkt, das durch Zusammenschmelzen von Asphaltsteinpulver mit flüssigem Goudron, d. h. einem mit dünneren Oelen (Paraffinöl, Petroleumrückstand) zusammengeschmolzenen Trinidadasphalt erhalten wird und 15 bis 20% Bitumen enthält.

In dem eigenen Bitumen ist das Asphaltpulver nicht schmelzbar.

Das mit dem Flußmittel, meistenteils Trinidad Epuré geschmolzene Asphaltmehl kommt als Trinidad Goudron oder nur als Goudron in den Handel. Andere Flußmittel sind dünnflüssige natürliche Bergteere, Rückstände der Petroleum- oder Schieferdestillation, dickflüssige Roherdöle, phenolfreie Braunkohlenteeröle, (Paraffinöle). Als geringwertiges Flußmittel gilt Steinkohlenteer oder Steinkohlenpech.

Das Einschmelzen des Asphaltpulvers und des Goudrons geschieht in eisernen Kesseln, wobei das Asphaltpulver in den auf 175 bis 230° erhitzten geschmolzenen Goudron unter ständigem Rühren eingetragen wird. Der fertige Mastix wird in runde, ovale oder sechseckige Formen, die 10 bis 15 cm hoch sind, zu sogenannten Mastixbroten gegossen.

Diese werden zur Herstellung von Trottoiren zerschlagen und in Kesseln unter Zugabe von Goudron und Kies geschmolzen. Die Schmelze wird warm auf möglichst glatter Unterlage 2 cm stark verstrichen.

An Stelle des natürlichen Asphaltsteinpulvers werden auch Mischungen von natürlichem Bitumen mit gemahlenem kohlensauren Kalk verwendet.

4. Produktionsmengen. Der Trinidadasphalt wird in einer Jahresproduktion von 150 000 t gewonnen, die mehr als $^3/_4$ des Bitumenbedarfs der Erde darstellt.

5. Verwendung. Die Benutzung des Asphalts als Dichtungs- und Einbalsamierungsmittel ist seit der frühesten geschichtlichen Zeit bekannt. Nach der Bibelerzählung hat Noah schon seine Arche gegen die Sintflut mit Asphalt abgedichtet. Die Babylonier benutzten ihn bei ihren Bauten als Mörtel, und die Aegypter beim Einbalsamieren. Die Verwendung des Asphalts in neuerer Zeit zur Straßenbelegung ist eine der wichtigsten. Gußasphalt ist ein vorzügliches Mittel zum Dichten von Fugen aller Art und wird zu diesem Zweck bei Holzstöckel- und Steinpflasterungen, sowie bei Rohrdichtungen usw. gebraucht. Sehr wichtig ist seine Verwendung ferner als Isoliermaterial gegen Feuchtigkeit, Grundwasser, Regenwasser usw. bei Bauten. Es werden hier vielfach mit Asphalt getränkte Isolierfilzplatten usw. gebraucht.

Als Surrogat für Asphalt dienen Destillationsrückstände von Erdöl, Schieferöl, Braunkohlenteer und Steinkohlenteer, in neuerer Zeit auch pechartige Rückstände der Fettdestillation. Am wenigsten geschätzt sind die letzteren; in gewissen Mengen zugesetzt, werden sie allerdings vielfach, z. B. auch bei Isolierungen für Untergrundbahnbauten zugelassen.

Eine wichtige Verwendung von Asphalt, besonders der hochschmelzenden Sorten besteht in der Benutzung als Lackgrundlage für Kutschenlacke, Eisengerätlacke usw., wobei der Asphalt in Benzol, Terpentinöl usw. gelöst wird. Nach dem Verdunsten des

Lösungsmittels bleiben die harten, glänzenden Asphaltschichten zurück.

6. Chemische Zusammensetzung. Die bituminösen Kalksteine enthalten wechselnde Mengen Asphalt neben kohlensaurem Kalk und Magnesia als anorganischen Hauptbestandteilen und tonigen und sonstigen Beimengungen.

Z. B. enthält der Asphaltstein von San Valentino in Italien 10,7 bis 15,7 % Bitumen, 50 bis 86 % kohlensauren Kalk, 1 bis 32 % kohlensaure Magnesia und 0,5 bis 2,7 % Kieselsäure, Tonerde, Eisenoxyd, Feuchtigkeit usw.

Das ausgeschmolzene oder mit Lösungsmitteln extrahierte reine Bitumen unterscheidet sich von Erdölpech, d. h. den durch Destillation von Erdölen gewonnenen asphaltähnlichen Destillationsrückständen in der Regel durch hohen, meistens 2 bis 10 % betragenden Schwefelgehalt und geringeren Paraffingehalt. Derna-Asphalt, Mexico-Asphalt und gewisse kaliformische Erdölrückstände lassen sich nicht in diese chemische Klassifizierung glatt einreihen. In der Regel ist der Sauerstoffgehalt des Naturasphalts höher, während der Kohlenstoffgehalt gewöhnlich wesentlich geringer ist als bei Erdölpech.

Der Kohlenstoffgehalt beträgt z. B. bei Trinidadasphalt etwa 81 %, der Wasserstoffgehalt etwa 9 %, der Schwefelgehalt 4,2, der Sauerstoff etwa 5 %. Bei Erdölpech ist der Kohlenstoffgehalt um 5 bis 7 %, der Wasserstoffgehalt um 1 bis 2 % höher als bei Naturasphalt, der Schwefelgehalt beträgt gewöhnlich nur 0,5 bis 1,5 %.

2d) Erdwachs. 1. Vorkommen. Erdwachs, eine im Rohzustand schwarze, weiche bis hartwachsartige, in den besseren Qualitäten Marmor- oder Sprungwachs heißende Masse wird hauptsächlich in Boryslaw, Starunia und Wolanka in Ostgalizien gefunden, die übrigen Vorkommen in der Walachei (Rumänien), Rußland usw. haben sich als unerheblich erwiesen. Es findet sich in Boryslaw in verschiedenen Tiefen, z. B. in 250 bis 300 m Tiefe, in der es zur Zeit aufgebaut wird, in blätterigen, gelblichbraunen weichen Massen, eingelagert zwischen Schichten von Schiefer und Sand, die durch bituminöse Flüssigkeit (Erdöl) schwarz gefärbt sind. Infolgedessen ist an den Abbaustellen auch vielfach ein starker Geruch nach Erdöl bemerkbar.

Die Härte des Erdwachses nimmt mit der Tiefe ab. Die härteste Abart „Boryslawit" (Marmorwachs) fand sich bis 100 m Tiefe häufig, bei 200 m selten und verschwand in noch größerer Tiefe.

Die meist steilen Erdwachsgänge haben insbesondere auf der Liegendseite scharfe zumeist glatte schwarze Salbänder und führen vorwiegend Brocken des Nebengesteins, welches mittels Erdwachs verbunden ist. Grössere Platten und Klumpen Erdwachs findet man an den Salbändern, während in der zerriebenen Gangausfüllung das Erdwachs als sogenanntes Lepwachs unregelmäßig eingesprengt ist, diese fettige Gangerde enthält 0,5 bis 3 % Wachs.

2. Entstehung. Schon der Umstand, daß Erdwachs sich immer in der Nähe von Erdöl und oft von erdölartigen Ausschwitzungen im Muttergestein direkt begleitet findet, weist auf die genetische Beziehung zwischen Erdwachs und Erdöl hin. Fast alle hochsiedenden Zylinderöle, d. h. die höchstsiedenden Anteile des Erdöls, enthalten neben darin gelösten asphaltartigen Stoffen auch erdwachsartige, amorphe Stoffe von nahe bei + 70° liegenden Schmelzpunkten. Daher ist anzunehmen, daß auch das Erdwachs wie Erdöl aus tierischen und pflanzlichen Fett- und Wachsresten entstanden ist und zwar wahrscheinlich gleichzeitig mit dem Erdöl, aus dem es später sich durch Versickerung der leichter flüssigen Anteile abgelagert hat.

3. Gewinnung. Das Erdwachs wurde früher in Boryslaw in zahlreichen Schächten, die schließlich die Form eines Raubbaues annahmen, gewonnen. Durch die neuen Berggesetze ist die Gewinnung nur noch auf wenige Schächte beschränkt. Das Erdwachs wird in diesen Schächten zurzeit in etwa 300 m tiefem Stollenbau durch Abschlagen vom Muttergestein gefördert. Das zutage geförderte Erdwachs wird in einer größeren Zahl nebeneinander stehender Kessel geschmolzen, damit sich die erdigen Beimengungen absetzen. Letztere werden nochmals in besonderen Schlemmteichen, in denen sich erhitztes Wasser befindet, von Wachsteilen gesondert. Das sich oben ansammelnde Erdwachs wird abgeschöpft und nochmals zusammengeschmolzen.

Die homogen flüssige Erdwachsschmelze wird in Formen (abgestumpfte Kegel) gegossen, in denen es erstarrt und sieht dann braunschwarz aus.

4. Produktionsmengen. Die Jahresproduktion an Erdwachs beträgt etwa 8000 t.

5. Verwendung. Das Erdwachs wird hauptsächlich nach erfolgter Raffination mit konzentrierter Schwefelsäure und Blutlaugensalzrückständen als sogenanntes naturgelbes d. h. einmal gereinigtes oder doppelt gereinigtes weißes Ceresin verwendet und zwar entweder in Mischung mit farblosem Paraffin oder Vaselinöl zur Herstellung künstlicher Vaseline oder als Kerzenstoff für die orientalischen Gottesdienste oder auch als Zusatz zu Schuhcreme, zu Isoliermaterialien für Kabel usw. Da der Bedarf an Ceresin groß, die Produktionsmenge aber gering ist, wird es fast regelmäßig mit Paraffin verfälscht in den Handel gebracht.

6. Chemische Zusammensetzung. Das Erdwachs besteht in der Hauptsache, abgesehen von den die braunschwarze Farbe bedingenden Verunreinigungen, aus den festen Gliedern der Methankohlenwasserstoffreihe, in untergeordneten Mengen aus ungesättigten und aromatischen Kohlenwasserstoffen.

Die Elementaranalyse des Borsylawer Wachses ergab 84,94% Kohlenstoff und 14,87% Wasserstoff (Hofstädter). In der tiefschwarzen, harzigen Substanz, welche die Färbung des Ozokerits bewirkt und von Reicher isoliert wurde, fand dieser 83,65% Kohlenstoff, 12,56% Wasserstoff und 3,79% Sauerstoff. R. Zaloziecki und J. Muck haben 3 bis 5,3% eines Farbstoffes isoliert, dessen Gehalt in den minderen Wachssorten bis zu 12,3% stieg.

2e) Schieferbitumen. 1. Vorkommen. Bituminöse Schiefer (Stinkschiefer), d. h. bituminöse Massen enthaltender Schiefer findet sich in vielen Formationen z. B. Jura, hauptsächlich in Schottland, in Kanada, ferner in Messel bei Darmstadt, in Seefeld (Tirol) u. a. Das Schieferbitumen ist nicht wie z. B. ein erheblicher Teil des Braunkohlenbitumens in organischen Lösungsmitteln wie Benzol usw. löslich.

In Schottland ist das Vorkommen so reich, daß eine verhältnismäßig große Industrie, die sogenannte schottische Schieferindustrie, seit mehreren Jahrzehnten die Ausnutzung des Bitumens betreibt.

In Messel kommt eine mehr der Kohle sich nähernde Schieferart vor.

Der Seefelder Schiefer zeigt viele auf die Herkunft des Bitumens hinweisende Fischabdrücke (ἰχθύς = Fisch, Oleum = Oel) und liefert beim Destillieren das sogenannte Ichtyolrohöl.

2. Entstehung. Wie schon die Versteinerungen mariner Tierreste und auch sonstige geologische und chemische Gründe annehmen lassen, ist das sich in den bituminösen Schiefern findende Bitumen wahrscheinlich wie das Erdöl aus tierischen vorwiegend marinen Resten durch Verwesung der Eiweißstoffe und allmähliche Bituminierung der zurückgebliebenen Fettreste entstanden.

Nach Potonié rechnen die bituminösen Schiefer oder Stinkschiefer zu den Sapropeltonen, in denen das Bitumen sich aus mit dem geologischen Alter verhärteten Faulschwamm, entstanden aus abgestorbenen mikroskopischen Schwebeorganismen (Plankton) gebildet hat.

3. Gewinnung. Die vorteilhafteste Ausnutzung des Schieferbitumens ist die trockene Destillation (Schwelen) des Schiefers in Retorten, bei denen sogenannte Schwelgase und ein Rohteer gewonnen werden, der bei dem schottischen und Messeler Schiefer wieder in besonderen Destillationsblasen in die einzelnen Fraktionen und Rückstände, Benzin, Solaröl, Gasöl, Schmieröl, Pech, Rohparaffin, zerlegt wird. Die einzelnen Oel- und Paraffinfraktionen werden durch geeignete Reinigungsprozesse, z. B. Raffinieren der Oele mit konzentrierter Schwefelsäure, Aufschmelzen des Rohparaffins mit Photogenöl, Auskristallisierenlassen und Ausschwitzen der letzten Oelreste aus dem Paraffin in warmen Räumen auf den gewünschten Reinigungszustand gebracht.

Der jetzt in Schottland geschwelte Schiefer gibt gegenüber der früher dort verarbeiteten bitumenreichen Bogheadkohle, die 35% Teer lieferte, nur 8 bis 14% Teer. Der Messeler bituminöse Schiefer ergibt 6 bis 10% Teer. Es ergaben:

	schottischer Schieferteer %	Messeler Teer %
Naphtha etwa . .	4	4
Oeldestillat	48	50—55
Rohparaffin . . .	12	12—15
Koks, Gas, Verlust	35	33

In Schottland wird der Schiefer in stehenden kontinuierlich arbeitenden Retortenöfen der Systeme Hendersen und Young-Beilby unter Mitwirkung von überhitztem Wasserdampf geschwelt.

Das Auskristallisierenlassen des Paraffins aus den geschmolzenen Lösungen geschieht überall durch Kältemaschinen.

Das Paraffinschwitzverfahren der schottischen Schieferölindustrie rührt von Hendersen her.

Das bei der Destillation des Seefelder Schiefers erhaltene Rohöl wird durch besondere chemische Bearbeitung in ein chemisch pharmazeutisches Präparat „Ichtyol" übergeführt.

4. Verwendung. Die Destillate des Schieferteers und die flüssigen und festen Rückstände der Destillation werden entsprechend denjenigen der Erdöl- und Braunkohlenteerdestillation verwendet, d. h. die flüssigen Destillate als Leuchtöl, Gasöl, geringes Schmieröl, das Paraffin als Kerzen- und Imprägnierungsmaterial, die Rückstände der Destillation als Asphaltsurrogat bezw. die verkokten als Heiz- oder Elektrodenstoff. Die permanenten Gase werden zur Feuerung der Retorten, zur Beleuchtung der Arbeitsräume oder zum Antrieb von Motoren benutzt. Abfallöle werden auch zum Heizen verwendet.

Das beim Schwelen übergehende ammoniakhaltige Wasser (0,6% Ammoniak) wird auf Ammoniumsulfat verarbeitet. Die Schwel-

wässer der Messeler Schieferkohle liefern noch Brenzkatechin.

Das Ichtyolrohöl wird im Gegensatz zu den übrigen Schieferölen nur zu pharmazeutischen Zwecken verwendet.

5. Chemische Zusammensetzung. Der Schiefer enthält so, wie er aus der Grube kommt, weder Oele noch ölige Substanz, auch läßt sich nicht durch Extraktion aus ihm ölige Substanz gewinnen, sondern nur durch Schwelen bei hoher Temperatur, wodurch, wie beim Schwelen der Braunkohle, eine Zersetzung des festen Bitumens in ölige Substanzen erfolgt.

Die gewöhnlichen Schieferteere sind ähnlich dem Braunkohlenteer zusammengesetzt, d. h. sie enthalten flüssige und feste Paraffinkohlenwasserstoffe, ungesättigte Kohlenwasserstoffe der Aethylenreihe, aromatische Kohlenwasserstoffe in kleineren Mengen, organische Stickstoffverbindungen, die übrigens auch auf den tierischen Ursprung hinweisen, und kleine Mengen phenolartiger Produkte. Der technische Charakter der aus dem Rohteer gewonnenen Destillate wird aber hauptsächlich durch den Gehalt an gesättigten und ungesättigten Kohlenwasserstoffen bedingt. Dagegen fehlen die kondensierten Naphthene und zyklischen ungesättigten Kohlenwasserstoffe, welche (insbesondere erstere) den viskosen Schmierölcharakter der hochsiedenden Oele aus Rohpetroleum bedingen.

Das Ichtyolrohöl ist stark schwefelhaltig und von durchdringendem Geruch, es siedet zwischen 100 und 255°, die Fraktionen riechen höchst unangenehm und merkaptanartig, es nimmt daher gegenüber den übrigen Schieferteeren eine ganz gesonderte Stellung ein.

2f) Braunkohlenbitumen. Rohes Montanwachs. 1. Vorkommen. Die sogenannte Schwelkohle unterscheidet sich von der zur Feuerung dienenden Braunkohle durch ihren größeren Gehalt an Bitumen und die hiermit zusammenhängende Eigenschaft, beim Erhitzen in Retorten (Schwelen) Teer in erheblicheren Mengen abzugeben.[1]) Die Schwelkohle wird hauptsächlich in den sächsisch-thüringischen Braunkohlenwerken neben Feuerkohle gewonnen. Beide Kohlenarten kommen gewöhnlich nicht in fortlaufenden Flözen, sondern in Mulden, die mehr oder weniger tief liegen und oft mannigfache Verwerfungen zeigen, vor. Gute Schwelkohle ist heller, Feuerkohle dunkelbraun gefärbt. Die reinste, jetzt nicht mehr gefundene Schwelkohle, sog. Pyropissit war fast weiß und gab beim Schwelen 64 bis 66% Teer und 58% in Benzol lösliches Bitumen.

[1]) Scheithauer-Muspratt. Paraffin und Mineralöle. E. Graefe. Die Braunkohlenteerindustrie Halle a. S. 1906.

Die jetzt gewonnenen Schwelkohlen geben weniger als die Hälfte der obigen Teermengen und gelten noch als gut verschwelbar, wenn sie 10% Teer bei 52% Wassergehalt, 32% Koksrückstand und 6% Gasverlust geben. Bei gutem Absatz für Grudekoks, den Rückstand der Schwelerei werden auch noch Kohlen geschwelt, die nur 3% Teer liefern.

Schwel- und Feuerkohle kommen in der Regel zusammen vor und zwar durchziehen die helleren Streifen der Schwelkohle in den Braunkohlenflözen diejenigen der dunkleren Feuerkohle und werden im Tagebau getrennt voneinander gewonnen, damit die Schwelergebnisse der Schwelkohle nicht ungünstig durch Beimengung der Feuerkohle beeinflußt werden.

2. Entstehung. Das Vorkommen von Holzüberresten und Harzsäuren in der Schwelkohle läßt auf eine Entstehung aus wenigstens vorwiegend pflanzlichen Resten schließen. Nach v. Fritsch sind in der Schwelkohle Umwandlungsprodukte von Harzen von Laub- und Nadelholzbäumen der Tertiärzeit zu erblicken, während die mit der Schwelkohle gleichzeitig vorkommende Feuerkohle der eigentlichen Holzsubstanz jener Bäume ihre Entstehung verdanken soll. Scharfe Trennung zwischen Feuer- und Schwelkohle läßt sich nicht aufrecht erhalten, da nach dem oben Gesagten unter Umständen selbst Feuerkohlen mit wenigen Prozenten Schwelteerausbeute noch geschwelt werden. Nur wo die Natur selbst bitumenreiche und bitumenarme Kohle unvermittelt schichtenweise übereinander gelagert hat, wie bei manchen Tagebauten sich zeigt, kann eine strengere Differenzierung beider Kohlearten in Frage kommen.

Nach Fritsch müßte sich die Schwelkohle, sofern sie aus Harz entstanden und durch Wasser von der schwereren Feuerkohle getrennt sein soll, immer im Hangenden der Flöze oder doch wenigstens in den oberen Partien der Lager finden, während sie oft in die Feuerkohle eingebettet ist oder das Liegende der Flöze bildet.

Heinhold nimmt deswegen an, daß Schwankungen des Wasserspiegels aus der Flora, welche die Kohlen bildete, einmal die Bildung von Feuerkohle, das andere Mal die Bildung von Schwelkohle in der Weise veranlaßten, daß bei langer Bedeckung des Pflanzenmaterials durch Wasser durch Abschnitt der Sauerstoffzufuhr Vertorfung und schließlich Feuerkohlenbildung, bei zurücktretendem Wasserspiegel durch Oxydation der trocken liegenden Teile Verwesung der celluloseartigen Stoffe unter Bildung von Kohlensäure und Wasser und Aufspeicherung der widerstandsfähigen Harze, des Materials der Schwelkohle, stattfand. Je weiter die Verwesung vorgeschritten war, um so bitu-

menreicher war die entstandene Schwelkohle, deren beste Abart der Pyropissit ist. Vgl. hierzu auch F. Raefler, Die Entstehung der Braunkohlenlager zwischen Altenburg und Weißenfels, Halle 1911.

3. Gewinnung. Das Bitumen der Schwelkohle wurde bis vor wenigen Jahren nur durch einen Zersetzungsprozeß, das sogenannte Schwelen, ausgenützt, indem die Kohle in stehenden Rolleschen Schwelöfen trocken destilliert und der paraffinhaltige Teer in Vorlagen aufgefangen wurde. Die Erhitzung der Oefen geschieht durch Kohle und Schwelgas, die bei der Schwelung selbst entstehen. Beim Schwelen verliert die Kohle zunächst ihren Wassergehalt, und erst bei stärkerer Erhitzung wird das Bitumen in Teer, Wasser und Gas zersetzt, während gleichzeitig die übrigen Bestandteile der Kohle unter Gas und Wasserabgabe zu Koks zersetzt werden. Der mit dem Teer entweichende, durch Zersetzung entstandene Wasserdampf treibt die Teerdämpfe schneller aus dem heißen Ofeninnern heraus und schützt sie so vor zu weitgehender Zersetzung.

Destilliert man in starkem Dampfstrom unter Ueberhitzung des Dampfes, so erhält man einen großen Teil des hochschmelzenden Bitumens unzersetzt (D.R.P. 2232 von Ramdohr).

Der beim Schwelen in den Teersammlern aufgefangene Teer wird durch Niveauröhren von dem mit übergegangenen unter dem Teer befindlichen schwereren Wasser getrennt.

Das Schwelwasser ist der Menge nach ein Hauptprodukt des Schwelprozesses, es ist trübe, gelblich gefärbt, riecht teerig und ist schwach basisch. Die darin enthaltenen von Rosenthal untersuchten Stoffe (Alkohol, Aldehyde, Ketone, Essigsäure, Phenole, Ammoniak usw.) sind nicht in lohnender Menge vorhanden, so daß das Schwelwasser ein lästiges Abfallprodukt ist. Neuerdings wird es durch Filtration über Grudekoks gereinigt und der Ammoniakgehalt zur Düngung nutzbar gemacht.

Der Teer, das Hauptprodukt der Schwelung, wird, ähnlich wie unter Schieferteer beschrieben, durch erneute Destillation, Abpressen des Paraffins aus den Rohparaffindestillaten usw. auf reines Paraffin und Paraffinöle verarbeitet. Neuerdings werden nach einem Patent der Riebeckschen Montanwerke dem Rohteer vor der Destillation durch Behandeln mit 95prozentigem Alkohol die Phenole entzogen, welche Behandlung die spätere Reinigung der Teerdestillate mit Laugen und erhebliche damit verknüpfte Verluste vermeiden und die wertvollen Phenole von vornherein ohne umständliche Operation rein gewinnen läßt.

Bedeutend wertvoller, aber in der Regel nur in geringerer Menge aus der Schwelkohle als der Teer zu gewinnen ist das hochschmelzende in der Schwelkohle enthaltene unzersetzte Bitumen. Die oben erwähnte, von Ramdohr schon 1869 und 1878 versuchte direkte Gewinnung des Bitumens aus der Schwelkohle durch Behandeln mit Wasserdampf hat sich nicht bewährt, weil das gewonnene Bitumen auch Teer enthielt und weitere kostspielige Verarbeitung erforderte. 1897 hat aber E. v. Boyen eine wirtschaftliche Gewinnung des Bitumens ausgearbeitet, indem er aus der grubenfeuchten Kohle das Rohbitumen mit überhitztem Wasserdampf übertrieb oder es mit Extraktionsmitteln, z. B. Benzol aus der Kohle extrahierte und durch Destillation des Rohbitumens mit auf 250° erhitztem Wasserdampf weißes kristallisiertes Montanwachs vom Schmelzpunkt 80° gewann. Als Lösungsmittel für das Bitumen hat H. Köhler später geschmolzenes Naphthalin empfohlen.

Der Schmelzpunkt des extrahierten Lösungsmittels hängt von dem benutzten Lösungsmittel und der Art der Kohle ab und liegt meistens zwischen 70 und 80°. Neuerdings wird auch Rohbitumen, ähnlich wie Ozokerit mit Paraffin zusammengeschmolzen, mit konzentrierter Schwefelsäure und Entfärbungspulver raffiniert.

4. Produktionsmengen. An Rohbitumen werden zurzeit etwa 8000 Tonnen jährlich gewonnen. Auf Teer verschwelt wurden im Jahre 1908 16100000 hl Kohle. Teer wurde 1908 im ganzen 592000 dz und 1909 rund 600000 dz beim Schwelen gewonnen, woraus neben dem Paraffin über 300000 dz Paraffinöl erzeugt wurden.[1])

5. Verwendung. Das Rohbitumen der Braunkohle wird zur Herstellung von Schuhcreme, zur Lederimprägnierung, zu elektrischen Isoliermaterialien usw. benutzt. Das destillierte helle Montanwachs dient als Zusatz zu hellen Schuhcremen, zu Ceresin, Carnaubawachs usw.

Der Rohteer, welcher das primäre Hauptverarbeitungsprodukt der Schwelkohle bildet, wird nur in seinen weiteren Verarbeitungsprodukten benutzt, nämlich das aus ihm abgeschiedene Paraffin als Kerzenmaterial für sich oder in Mischung mit Stearin, in untergeordneten Mengen auch in Mischung mit Ceresin, Wachs, Montanwachs usw. Die aus dem Teer abgeschiedenen Oele, die sogenannten Paraffinöle werden hauptsächlich als Gasöl zur Gewinnung des sogenannten Oelgases benutzt, indem sie in glühenden Retorten in Leuchtgas z. B. für Eisenbahnwagenbeleuchtung übergeführt werden.

Die leichteren Oele, sogenannte Solaröle, werden auch unmittelbar zur Beleuchtung, die schwereren kreosothaltigen Oele zur

[1]) E. Graefe. Braunkohle 1910, 9, 391.

Imprägnierung gegen Fäulnis benutzt. Die Rückstände der Destillationen z. B. Braunkohlenteergoudron, dienen als Surrogat für Natur- und Erdölasphalt zu Isolierungen, Straßenbauzwecken, Lacken usw. Der Koksrückstand dient als Heizmaterial.

6. Chemische Zusammensetzung. Das Rohbitumen der Braunkohle besteht aus sogenannten Estern hochmolekularer hochschmelzender Säuren (Montansäuren) mit hochschmelzenden Alkoholen und enthält auch Cholesterinabkömmlinge.

Es läßt sich durch Extrahieren mit Lösungsmitteln nicht völlig aus der Braunkohle entfernen, 40 bis 50 % des Bitumens, unter Umständen 90 % und noch mehr verbleiben in der Kohle.

Der durch Schwelen der Kohle erhaltene Teer ist ein Zersetzungsprodukt des in der Kohle enthaltenen löslichen und unlöslichen Bitumens. Er besteht aus festen und flüssigen gesättigten und ungesättigten Kohlenwasserstoffen als Hauptbestandteilen, enthält merkliche Mengen aromatischer Kohlenwasserstoffe und der von diesen sich ableitenden Kreosote, ferner kleine technisch belanglose Mengen von Pyridinbasen, Aldehyden, Ketonen, Schwefelwasserstoff, Merkaptanen usw.

Er liefert bei der technischen Verarbeitung 10 bis 15% Paraffin und 50 bis 60% Oele.

Literatur. *Benutzte Zeitschriften und Werke: Petroleum, Verlag Berlin W.; Braunkohle; Ber. d. chem. Gesellschaft, Berlin.* — **Engler-Höfer**, *Das Erdöl. Leipzig.* — **Hyp. Köhler**, *Chemie u. Technologie d. Asphalte. Braunschweig 1904.* — **E. Graefe**, *Die Braunkohlenteerindustrie, Halle a. S. 1906.*

F. Holde.

Black
Joseph.

Geboren 1728 zu Bordeaux; gestorben am 26. November 1799 in Edinburg. Er war der Sohn eines schottischen Weinhändlers, studierte in Glasgow und Edinburg, wurde 1756 Professor der Chemie und Anatomie in Glasgow und praktizierte dort als ein beliebter Arzt, 1766 Professor der Chemie in Edinburg. Er hat die Begriffe Wärmekapazität, spezifische Wärme, latente Wärme (Schmelzwärme, Verdampfungswärme) zuerst exakt erfaßt und so das Gebiet der Kalorimetrie eigentlich begründet.

Literatur. *Lectures on the Elements of Chemistry delivered in the University of Edinburg, Vorrede von* **John Robinson**, *1803. Deutsch von* **Crell**, *Hamburg 1804.* — **E. Mach**, *Die Prinzipien der Wärmelehre, S. 152, Leipzig 1896.*

E. Drude.



G. Pätz'sche Buchdr. Lippert & Co. G. m. b. H., Naumburg a. d. S.

Inhalt, nach Autoren.

[illegible] A. A., [illegible]		33	87	5	103
[illegible], Bestäubung.	V	24	6	1	85[illegible]
[illegible], Stachelhäuter. Echinodermata.		75	46	9	37[illegible]
[illegible], [illegible] Frucht und Samen.		33	21	4	37[illegible]
[illegible], Kristallphysik, Optische Eigenschaften.		35	20	5	103
[illegible] Metallische [illegible]	V	7	5	11	1182
[illegible] Luftfahrt.	V	26	15	6	47[illegible]
Benecke, W. Bakterien, allgemeine Physiologie der		19	—	1	737
Parasiten.		16	8	7	4[illegible]
Saprophyten.		7	—	8	55[illegible]
Stoffwechsel der Pflanzen.		29	—	9	72[illegible]
Berek, M. Mikroskop, [illegible]		11	21	6	9[illegible]
Bergeat, A. Erzlagerstätten.		37	14	3	73[illegible]
[illegible]mann, W. Leuchtgas.		8	4	6	16[illegible]
Berwerth, F. Meteoriten.	V	17	—	6	8[illegible]
[illegible], A. [illegible]	V	21	—	8	11[illegible]
[illegible]mann, A. Phoronis. Röhren-Würmer.		5	8	7	707
Blochmann, F. Brachiopoda. Armfüßer.		14	33	2	14[illegible]
Molluscoidea.		1	—	6	104[illegible]
[illegible], H. Funktionswechsel der [illegible]	V	9	3	4	43[illegible]
[illegible], L. [illegible] & [illegible]		11	2	6	91[illegible]
Salzlagerstätten.		18	17	8	54[illegible]
Born, M. Infinitesimalrechnung.		12	18	5	[illegible]3
Lichtfortpflanzung in bewegten Medien.		7	6	6	287
Prinzipien der Physik.	V	8	—	7	1118
Börner, C. Arthropoda.		9	—	1	54[illegible]
[illegible]	V	10	15	10	[illegible]
Börnstein, R. Atmosphäre: Meteorologie.		33	22	1	[illegible]
Feuchtigkeit.		6	4	3	104[illegible]
Borsche, W. Substitution.		4	—	9	853
Böttger, W. Anorganische Chemie.		1	—	1	4[illegible]

Chemische Analyse, anorganische.	14	—	2	[illegible]
Chemische Verbindungen.	6	—	2	57
Physikalisch-chemische Analyse.	5	—	7	152
Physikalische Chemie.	1	—	7	153
Systematik der Mineralchemie: Allgemeine u. anorganische Chem.	2	—	1	911
Bower, F.O. Farne im weitesten Sinne, Fortpflanzung	19	25	3	913
Fortpflanzung der Gewächse: Archegoniaten. Allgemeines	1	—	4	162
Fortpflanzung der Gewächse: Archegoniaten. Farne.	16	8	4	175
Branca, W. Fossilien, Fossilisationsprozess.	4	—	[illegible]	[illegible]
Gastropoda, Paläontologie.	12	17	8	[illegible]
Braun, G. Niveauverschiebungen.	9	—	7	187
Braune, F. Sauerstoffgruppe, Schwefel.	31	1	8	576
Brauns, R. Farben der Mineralien.	6	—	3	86
Kristalle, flüssige.	15	12	5	107
Schmucksteine, künstliche.	7	5	8	965
Breisig, F. Telegraphie.	14	22	9	1025
Telephonie.	14	22	9	1135
Bresslau, E. Plathelminthes (Rhabdocoelen)	42	43	7	851
Brüel, L. Zelle und Zellteilung. Zoologisch.	103	113	10	387
Buchner, P. Chätognathen.	2	3	2	257
Buddenbrock, W.v. Bryozoen. Moostierchen.	18	26	2	21
Bühler, K. Aufmerksamkeit.	9	—	1	772
Denken.	7	—	2	889
Zeitsinn und Raumsinn.	22	14	10	726
Burgeff, H. Symbiose zwischen Pflanzen u. Pilzen u. Bakter.	17	18	9	441
Bürker, K. Blut.	23	15	2	47
Busch, H. Elektrischer Widerstand.	16	21	3	32
Transformatoren.	20	43	9	1052
Büsgen, M. Baum.	13	1	1	467
Nutzhölzer.	15	16	7	199
Byk, A. Drehung der Polarisationsebene.	20	23	2	1115

Chemische Einheiten.		6	—	2	[illegible]
Flüssigkeiten.		15	—	4	[illegible]
Molekular-Lehre.		25	—	6	[illegible]
Stöchiometrie.		12	—	9	[illegible]
Du Bois-Reymond, R. Bewegung, spezielle Physiologie d.	V	16	14	1	[illegible]
Durig, A. Atmung; Physiologie d. [illegible] d. Blutgase.		42	1	1	[illegible]
Wärmehaushalt.		44	—	10	42
Ebler, E. Berylliumgruppe. Radium.	V	15	—	1	[illegible]
Borgruppe. Aktinium.	V	3	—	2	[illegible]
Heliumgruppe. Edelgase.		8	—	5	[illegible]
Kohlenstoffgruppe. Thorium.		5	—	6	[illegible]
Sauerstoffgruppe. Uran.		3	—	8	63[illegible]
Edinger, L. Gehirn-Zentralnervensystem. Funktion.	V	26	13	4	[illegible]
Rückenmark, Physiologie des, u. d. [illegible] Nerven.	V	19	6	8	[illegible]
Eibner, A. Farben.		14	—	3	[illegible]
Ehle, R. Farbstoffe.		41	—	3	[illegible]
Emde, F. Elektrische Maßsysteme.		10	2	3	263
Emich, F. Chemische Analyse: Mikrochemisch.		7	3	2	[illegible]
Endell, K. Silikate.		4	—	9	[illegible]
Ernst, A. Fortpflanzung d. Gewächse: Samenpflanzen.		2	—	4	[illegible]
Fortpflanzung d. Gewächse: Gymnospermen.		13	17	4	[illegible]
Fortpflanzung d. Gewächse: Angiospermen.		14	20	4	[illegible]
Escherich, K. Insekten.		55	[illegible]	5	[illegible]
Exner, F. M. Atmosphärische Optik.		21	24	1	[illegible]
Finkelnburg, R. Gehirn-Nerven.		9	5	4	[illegible]
Fischer, E. Anthropogenese.	V	11	—	1	[illegible]
Anthropologie.	V	2	—	1	[illegible]
Fossile Hominiden.	V	25	22	4	[illegible]
Gehirn (Anthropologisch.)	V	3	—	4	[illegible]
Haar (Anthropologisch.)	V	5	—	5	[illegible]
Haut (Anthropologisch.)	V	4	—	5	[illegible]

Körperform des Menschen (Anthropologisch)	V	7	2	5	951
Rassen und Rassenbildung.	V	22	6	8	78
Rassenmorphologie.	V	9	10	8	106
Rassenpathologie.	V	1	—	8	115
Rassenphysiologie.	V	4	—	8	116
Schädellehre und Skelettlehre.	V	16	3	8	83
Sozialanthropologie.	V	16	—	9	17
Fischer, Ed. Fortpflanzung d. [illegible] Pilze.		6	13	4	17
Pilze.		49	92	7	88
Schleimpilze.		5	10	8	91
Fitting, H. Fortpfl. d. Gewächse: Folgen d. Bestäubung u. Befruchtung		4	—	4	26
Reizerscheinungen der pflanzlichen Organismen.		47	8	8	23
Flade, F. Berylliumgruppe: Calcium.		9	—	1	93
Berylliumgruppe: Strontium.		3	—	1	94
Berylliumgruppe: Barium.		7	—	1	94
Potential, elektrochemisches.		10	—	7	107
Wasserstoff.		10	—	10	52
Franz, V. [illegible]formation.	V	12	15	10	45
Franck, K. L. Kohlehydrate-Fermentation (mit F. Grimmann)		26	—	5	73
Frank, Ph. Bewegung. Allgemeine Bewegungslehre.		21	3	1	103
Drehbewegung.		27	5	2	108
Stoß.		7	—	9	75
Frech, F. Kambrium.	V	7	—	5	65
Freundlich, H. Adsorption.		6	1	1	59
Druck.		8	4	2	113
Mechano-Chemie.		19	2	6	77
Fröhlich, Fr. W. Elektrizitäts-Produktion (Organische)		17	22	3	37
Muskeln, allgemeine Physiologie.		23	14	6	1112
Nervensystem, allgemeine Physiologie des.		24	17	7	140
Reflexe.		15	16	8	14
Sympathisches Nervensystem.		10	1	9	95

Fuhrmann, J. Flüssigkeit.		11	22	4	73
Furtwängler, Ph. Pendel.		17	12	7	153
Gaede, W. Luftpumpen.	✓	11	16	6	496
Gehrcke, E. Anodenstrahlen.		3	3	1	463
Geitel, H. Glimmlichtähnliche Erscheinungen.		16	7	5	40
Gerdien, H. Atmosphärische Elektrizität.		19	1	1	8
Gerhardt, U. Geschlechtsorgane der Tiere.	✓	39	24	4	997
Gewecke, J. Kohlenstoffgruppe: Silicium.		9	—	5	880
Kohlenstoffgruppe: Zinn.		8	7	5	894
Kohlenstoffgruppe: Blei.		13	—	5	912
Lithiumgruppe: Lithium.		7	—	6	343
Stickstoffgruppe: Stickstoff.		12	—	9	522
Giesbrecht, W. Crustacea. Krebse.		34	44	2	738
Giesenhagen, K. Blatt.		34	40	2	1
Wurzel.		18	21	10	693
Goldberg, E. Photographie.		17	6	7	157
Photometrie, photographische.		2	—	7	777
Gonder, R. Spirochäta. Spermamassa.		7	12	9	1288
Göpel, F. Physikalische Technik.		6	—	7	867
Tourenzahl-Messer.		4	12	9	1087
Gossner, B. Kristall-Chemie. Chemische Kristallographie.		18	15	5	1056
Gothan, W. Kohlen.	✓	27	6	5	810
Paläobotanik.		52	39	7	408
Gramberg, A. Wärmemaschinen.	✓	13	15	10	996
Gran, H. H. Plankton.	✓	21	16	7	923
Grebe, L. Ultraviolett.		8	4	10	122
Groß, J. Vererbung.	✓	29	15	10	243
Grossmann, H. Fette, Öle, Seifen.		16	—	3	1077
Kohlehydrate = Zuckerarten. (mit P. R. Frank)		26	—	5	1084
Grubenmann, U. Gesteinsstruktur u. Gesteinstextur.		9	—	4	1066
Mineral- & Gesteinsbildung auf d. Wege d. Metamorphose.		11	—	6	934

[illegible] (Raumbestimmung)	18	26	7	75
Hennicke, C.R. Vögel.	√ 45	5	10	24
Herbst, C. Entwicklungsmechanik der Tiere.	√ 22	14	3	74
Hermann, F. Silurformation.	√ 15	45	9	18
Herz, W. Borgruppe. Bor.	3	—	2	25
Borgruppe. Aluminium.	5	—	2	[illegible]
Borgruppe. Gallium.	1	—	2	[illegible]
Borgruppe. Indium.	1	—	2	[illegible]
Stickstoffgruppe. Wismut.	6	—	9	[illegible]
Stickstoffgruppe. Vanadium.	4	—	9	615
Stickstoffgruppe. Niob.	3	—	9	[illegible]
Stickstoffgruppe. Tantal.	3	—	9	822
Hess, C.v. Gesichts-Sinn.	√ 27	8	4	1032
Hess, H. Eis.	17	1	3	410
Hesse, R. Biologie, Biologische Wissenschaften.	8	—	1	1139
Nervensystem, Anatomie des.	22	24	7	11[illegible]
Oekologie der Tiere.	21	6	7	229
Sinnesorgane, Anatomie der.	√ 51	31	9	31
Hezner, Laura. Gesteinsabsonderung.	5	6	4	1092
Petrochemie der metamorphen Gesteine.	7	1	5	611
Hinrichsen, F.W. Kautschuk.	2	—	5	739
Hinrichsen, W. Lithiumgruppe: Natrium.	9	—	6	357
Lithiumgruppe: Kalium.	6	—	6	386
Lithiumgruppe: Rubidium.	1	—	6	462
Lithiumgruppe: Cäsium.	2	—	6	463
Tinte.	2	—	9	1235
Hoffmann, R.W. Drüsen.	21	16	2	114[illegible]
Holde, F. Bitumina.	√ 15	2	1	1146
Holzapfel, A. Devonische Formation.	√ 7	18	2	857
[illegible], J. Aliphatische Kohlenwasserstoffe.	26	—	1	175
Kohlenwasserstoffe.	3	—	5	929

Lottermoser, A. Disperse Gebilde. Präparation. Teil.		9	—	2	1038
Kolloidchemie.		2	—	7	166
Luther, R. Photometrie.		16	19	7	763
Lühe, M. Parasitismus.		13	16	7	512
Lummer, O. Abbildungslehre.		31	22	1	8
Lichtbrechung.		18	29	6	244
Linsensysteme, geometrische Optik u. geometrische Abbild.		20	27	6	360
Optische Instrumente.	V	25	39	7	308
Strahlung: Wärmestrahlung.		20	10	9	769
Maas, O. Coelenterata.		50	55	2	658
Porifera Schwämme.		19	16	7	1026
Mannich, C. Pharmazeutische Präparate.		19	—	7	659
Marc, R. Aggregatzustände.		7	1	1	85
Hydrate.		6	4	5	330
Kristallisation.		12	4	5	1122
Marx, E. Elektrizitäts-Leitung in Gasen.		15	10	3	364
Maurer, F. Gewebe der Tiere.		43	77	4	1101
Hautdecke der Tiere.	V	28	34	5	212
Muskeln, Anatomie der Muskelfasern.		23	25	6	1089
Mayer, P. Mikrotome.	V	4	6	6	896
Mikroskopische Technik: Zoologie u. Anatomie.	V	3	—	6	900
Zoologische Methoden.	V	6	—	10	1022
Zoologische Stationen.		7	—	10	1028
Mecklenburg, W. Disperse Gebilde. Allgemein. Teil.		21	4	2	1017
Meyer, H. Anhydride.		2	—	1	425
Atmosphäre, physikalisch-chemisches Verhalten.	V	3	—	1	624
Basen, organische.		7	—	1	843
→ Oxyde.		6	—	7	402
Säuren, organische. Allgemeines.		8	—	8	766
Meinecke, F. Dünenformationen.	V	9	17	7	586
Meisenheimer, Jak. Anthracengruppe.		5	—	1	467

Aromatische Reihe.		2	—	1	5[illegible]
Benzolgruppe.		7	—	1	3[illegible]
Naphthalingruppe.		3	—	7	5[illegible]
Phenanthrengruppe.		2	—	7	2[illegible]
Meisenheimer, Joh. Exkretions-Organe.		26	33	3	8[illegible]
Geschlechtsbestimmung bei Tieren.	√	8	6	4	9[illegible]
Ontogenie. Entwicklungs-geschichte.		49	60	7	25
Pantopoda. Asselspinnen.		5	2	7	4[illegible]
Tiefseefauna.	√	17	13	9	1[illegible]
Tiergeographie.		49	19	10	2[illegible]
Meissner, R. Schutzmittel der Pflanzen.		19	12	8	[illegible]
Meissner, W. Manometer.		6	5	6	7[illegible]
Thermometrie (inkl. Pyrometrie).		19	19	9	112[illegible]
Wärmeausdehnung.		9	4	10	3[illegible]
Menge, P. Zement.		10	—	10	[illegible]
Meyer, H. Chemische Analyse, organische.		5	—	2	3[illegible]
Meyer, K. H. Ester.		16	—	3	[illegible]
Mie, G. Elektronen.	√	11	—	3	4[illegible]
Materie.	√	6	—	6	7[illegible]
Weltäther.	√	11	—	10	[illegible]
Miehe, H. Ameisenpflanzen.		10	4	1	25[illegible]
Bakterien. Morphologie.		10	13	1	[illegible]
Spaltpflanzen. Schizophyta. (mit H. Wehmer?).		8	11	9	1[illegible]
Moser, H. Oxydation.		10	—	7	312
Reduktion.		5	—	8	1[illegible]
Mügge, O. Kristall-Physik. Mechanische Eigenschaften.		20	11	5	115[illegible]
Mumm, O. Hydrolyse.		8	—	5	33[illegible]
Nacken, R. Mischkristalle. Pseudomorphosen.		5	—	1	[illegible]
Naef, A. Cephalopoda.		22	15	2	24[illegible]
Naumann, E. Schichtung.		5	4	8	[illegible]
Neger, F. W. Insektivoren. Karnivoren. Insekten-Blüten. Insekten-Pflanzen.	√	1[illegible]	15	5	5[illegible]

Eintrag					
Pilger, R. Angiospermen. [illegible]		31	29	1	36[illegible]
Plate, L. Deszendenztheorie.	✓	37	30	2	9[illegible]
Pockels, F. Doppelbrechung, akzidentelle.		11	8	2	1[illegible]
Pohl, R. Lichtelektrische Erscheinungen.		6	9	6	2[illegible]
Pompeckj, J. F. Amphibia. Paläontologie.	✓	9	6	1	3[illegible]
Amphineura. Paläontologie.	✓	4	3	1	3[illegible]
Annelidae. Paläontologie.		6	6	1	4[illegible]
Arachniden. Paläontologie.		7	14	1	5[illegible]
Brachiopoda. Paläontologie.		23	44	2	1[illegible]
Bryozoa. Paläontologie.		5	10	2	2[illegible]
Cephalopoda. Paläontologie.		32	40	2	2[illegible]
Chaetognatha. Paläontologie.	✓	1	1	2	2[illegible]
Coelenterata. Paläontologie.		16	24	2	5[illegible]
Crustacea. Paläontologie.	✓	25	[illegible]	2	7[illegible]
Fische (Pisces) Paläontologie.		40	53	3	1107
Lamellibranchiata. Paläontologie.		20	42	6	21
Myriapoda. Paläontologie.		5	6	6	1147
Paläontologie.	✓	8	—	7	470
Stachelhäuter, Echinodermata. Paläontologie.		35	73	9	457
Posner, Th. Ammoniakderivate.		43	—	1	2[illegible]
Azoverbindungen.		27	—	1	58[illegible]
Thio- und Sulfoverbindungen.		29	—	9	1148
Ungesättigte Verbindungen.		16	—	10	13[illegible]
[illegible], J. Sauerstoffgruppe. Selen.		4	—	8	607
Sauerstoffgruppe. Tellur.		3	—	8	611
Prandtl, L. Flüssigkeits-Bewegung.		[illegible]	[illegible]	4	101
Gas-Bewegung.		14	24	4	5[illegible]
Pringsheim, H. Gärung: [illegible]		11	—	4	53[illegible]
Pütter, A. Bewegung: Tierflug.	✓	5	5	1	[illegible]
Energetik der Organismen.		9	—	3	[illegible]
Lichtproduktion durch Organismen	✓	[illegible]	[illegible]	6	331

	Eintrag	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 4
V	Sinnesorgane, Physiologie der.	15	1	9	82
	Stoffwechsel, allgemeine Physiologie des.	24	8	9	680
	Raciborski, M. Organographie der Pflanzen.	3	—	7	369
	Sporen.	34	61	9	343
	Rauther, M. Fische (Pisces)	52	56	3	1055
	Reddelien, G. Aether.	8	—	1	67
	Aldehyde.	12	—	1	108
	Alkohole.	32	—	1	222
	Ketone.	13	—	5	744
	Phenole.	14	1	7	693
V	Reichenbach, H. Mikroskopische Technik: Bakteriologie.	3	—	6	903
V	Reichensperger, A. Symbiose: Tier u. Alge, Tier u. Tier	9	9	9	920
	Reinisch, R. Gesteine, technisch wichtige.	20	12	4	1077
	Gesteins-Technik.	4	—	4	1097
	Lagerungsform der Gesteine.	4	9	6	1
V	Mikrosk. Technik: Mineralogie, Kristallographie, Metallographie	3	—	6	908
	Renner, O. Wasserversorgung der Pflanzen.	19	10	10	538
	Xerophyten.	16	15	10	564
V	Rhumbler, L. Bewegungsorgane der Tiere.	18	3	1	1120
	— — — — — — — — — —	—	—	—	—
V	Correlation.	6	—	2	731
V	Körper-Regionen und Bauplan der Tiere.	13	3	5	904
V	Organe des tierischen Körpers.	9	—	7	333
V	Wachstum tierischer Körper.	18	—	10	364
	Ribbert, H. Pathologie.	30	—	7	525
	Richter, O. Reinkultur.	7	2	8	206
	Richters, F. Tardigrada.	5	10	9	1015
	Rikli, M. Geographie der Pflanzen. [illegible]-Reiche.	32	—	4	776
	Riecke, E. Dielektrizität der Kristalle, Pyro- u. Piezo-Elektrizität	12	2	2	1080
	Rieke, R. Porzellan.	10	—	7	1053
	Riesenfeld, E. H. Basen, anorganische.	3	—	1	840

Salze.		12	8	[illegible]	[illegible]
Säuren, Allgemeines.		1	—	8	[illegible]
Säuren, anorganische Allgemeines.		[illegible]	—	8	[illegible]
Ritzel, A. Ätzfiguren.		4	8	1	[illegible]
Erden, Mineralien mit seltenen.		4	—	3	[illegible]
Radioaktivität der Mineralien.		4	—	8	[illegible]
Titan-Mineralien.		2	—	9	123
Wolfram-Mineralien.		[illegible]	—	10	13[illegible]
Rogowski, W. Magnetische Messungen.		15	3[illegible]	6	66[illegible]
Rosenthal, W. Immunität.		27	—	5	35[illegible]
Roth, W. A. Thermochemie.		31	1	9	1047
Rothert, W. Gewebe der Pflanzen.		41	186	4	114[illegible]
Rübel, Ed. Geographie der Pflanzen, ökologische.		44	—	4	25[illegible]
Rüdenberg, R. Dynamo-Maschinen.		31	53	2	117[illegible]
Ruhland, W. Turgor.		17	1	10	9[illegible]
Runge, C. Graphisches Rechnen.		10	4	4	365
Sasse, F. Selenologie oder Mondkunde.	V	11	6	9	1
Sanden, H. v. Flächen-Messung.		6	6	3	1173
Rechen-Maschinen & Rechen-Hilfsmittel.	V	7	7	8	131
Sander, A. Feer.		4	—	9	102[illegible]
Sapper, K. Vulkanismus.	V	29	12	10	33[illegible]
Sauer, A. Geologische Karten.		12	—	4	94[illegible]
Sch[illegible], K. Azingruppe, inkl. Oxazine & Thiazine.		4	—	1	79[illegible]
Indigogruppe, inkl. Cumaron-Benzothiophen- & Thio-Indigogruppe.		6	—	5	[illegible]
Schaefer, C. Elektrische Influenz.		15	16	3	23[illegible]
Wellenausbreitung & Wellen-Interferenz.		24	[illegible]	10	55[illegible]
Schaefer, K. Absorption: Lichtabsorption.		18	[illegible]	1	41
Schall, C. Synthese: Elektrosynthese.		6	—	9	94[illegible]
Schauinsland, H. Fortpflanzung.		4	[illegible]	7	112
Schaum, K. Aliphatische Reihe		1	—	1	20[illegible]
Ammoniakarten, Beschreibung wichtiger.		4	—	1	30[illegible]

…tiany, Edm. Gerbung und Gerbstoffe.	6	—	4	96
…mm, A. Legierungen.	25	43	6	12.
Metalle.	16	5	6	12.
Stickstoffgruppe. Phosphor.	40	—	9	5.
Stickstoffgruppe. Arsen.	16	—	9	57.
Stickstoffgruppe. Antimon.	15	—	9	59.
…ohe, L. Indengruppe.	9	—	5	36.
Isocyklische Verbindungen.	12	—	5	3.
Ketten- und Ring-Systeme.	8	4	5	13.
Phototropie.	3	1	7	81.
Polyphenylverbindungen. Diphenylgruppe.	2	—	7	1020
Polyphenylverb. Diphenylmethangruppe.	2	—	7	1022
Polyphenylverb. Triphenylmethangruppe.	2	—	7	1024
Polyphenylverb. Dibenzyl- oder Diphenyläthangr.	2	—	7	102.
…romme, H. Grund-Wasser	10	6	5	12.
Quellen.	30	13	8	6
…linski, B. Naphtene.	5	—	7	2.
…ke, E. Schwere.	V 25	5	8	38.
…ichmann, E. Dimorphismus.	5	—	2	1012
Urzeugung.	V 6	—	10	15.
…iel, A. Chemische Apparate.	31	10	2	37.
Chemische Arbeitsmethoden.	28	—	2	434
Präparative Arbeiten.	12	—	7	1095
…iele, J. Amphineura.	V 7	12	1	345
Lamellibranchiata.	15	12	6	6
Mollusken.	4	4	5	1046
Scaphopoda.	3	3	8	832
…iene, H. Erdinneres.	V 6	—	3	716
Erdwärme	V 8	1	3	723
…oma, D. Wasserkraft- u. Wasserhebe-Maschinen	12	17	10	49.
…genstedt, R. Kreislauf des Blutes. Physiologie.	35	15	5	80.

Tischler, G. Fortpflanzung der Gewächse: Moose.		9	16	4	187
Toepler, M. Funken-Entladung.		8	2	4	412
Schlieren-Methode.	✓	5	6	8	924
Tönniges, C. Sporozoa.		40	50	9	364
Tornier, G. Reptilia.		22	21	8	315
Reptilien: Paläontologie.	✓	40	53	8	337
Trautz, M. Chemiluminescenz.		2	—	2	310
Chemische Kinetik.		30	—	2	519
Trendelenburg, W. Gehör-Sinn.	✓	17	—	4	733
Tröndle, A. Bewegungen der Pflanzen.	✓	17	21	1	1103
Lebens-Bedingungen der Pflanzen.		5	—	6	95
Wachstum der Pflanzen.		12	8	10	374
Tschulok, S. Botanik.		9	—	2	135
Tubandt, C. Zinkgruppe: Zink.		9	—	1	953
Zinkgruppe: Cadmium.		9	—	1	962
Zinkgruppe: Quecksilber.		11	—	1	971
Verhoeff, K. W. Myriapoda.		12	12	6	1135
Versluys, J. Amphibia.		25	23	1	313
Verworn, M. Hypnose.	✓	14	2	5	344
Lebens-Bedingungen.		7	—	6	88
Narkose.		7	—	7	31
Physiologie.	✓	7	—	7	873
Schlaf.	✓	12	1	8	906
Tod.	✓	6	—	9	1237
Zellphysiologie.		8	—	10	910
Vészi, J. Irritabilität.		27	16	5	572
Voigt, A. Faser-Pflanzen.		7	—	3	991
Voigt, W. Elektro-Optik.		6	—	3	457
Magneto-Optik.		13	8	6	702
Strahlende Ätherenergie.	✓	6	1	9	763
Wachsmuth, R. Klang.		7	5	5	775

[illegible]		1	—	4	942
— Zellenlehre.		23	45	8	857
— Zoogeographie.		1	—	9	821
[illegible] Graphische Darstellung.		15	36	5	104
[illegible] Entwicklungsmechanik der Pflanzen.	V	33	—	3	634
— Fortpflanzung d. Gewächse: Apogamie u. Parthenogenesis.		11	5	4	265
— Transplantation: Pfropfung, Pfropfbastarde.	V	11	21	10	18
Wolff, E. Korallenriffe, rezente.	V	10	3	5	947
Woltereck, R. [illegible] (mit F. [illegible])		39	33	1	427
— Würmer.		4	—	10	642
Wulff, G. Kristall-Struktur.		5	8	5	1188
Wüst, E. Quartärformation: Diluvium u. Alluvium.		5	—	8	1
Zacher, F. Orthopteren.		7	8	7	300
Zahn, G. W. v. Festland.	V	3	1	3	1030
— Flüsse.	V	30	41	4	43
— Seen: Süßwasser-Seen.	V	6	4	8	1155
Ziegler, H. E. Amphioxus.	V	7	8	1	358
— Leibeshöhle.		17	25	6	148
— Tierstaaten und Tiergesellschaften.	V	16	12	9	1204
— Zoologie.	V	31	10	10	991
Ziehen, Th. Psychologie, experimentelle.	V	10	—	7	1135
Zörnig, H. Heil- und Gift-Pflanzen.		34	—	5	262
Zschimmer, E. Glas.		7	4	5	44
Zwaardemaker, H. Geruch.		8	—	4	967
— Geschmack.		5	—	4	1027
[illegible]mann, F. Spaltpflanzen, Schizophyta. (mit H. Miehe)		8	11	9	188
Meigen, W. Karbonat-Gesteine. (mit G. Linck)		9	—	5	683
[illegible] Flagellata. (mit M. Hartmann)		47	99	3	1179





